



TUGAS AKHIR – MO.141326

**ANALISIS UMUR KELELAHAN PADA ANCHOR CHAIN
SINGLE POINT MOORING 3**

NABILA ARIFANNISA

NRP. 4312100099

Dosen Pembimbing :

Nur Syahroni S.T, M.T, Ph.D

Ir. Mas Murtedjo M. Eng

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2016



FINAL PROJECT – MO.141326

FATIGUE LIFE ANALYSIS OF SINGLE POINT MOORING 3 ANCHOR CHAIN

NABILA ARIFANNISA

NRP. 431210099

Supervisors :

Nur Syahroni S.T, M.T, Ph. D

Ir. Mas Murtedjo M. Eng

DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING

Marine Technology Faculty

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2016

Analisis Umur Kelelahan pada *Anchor Chain Single Point Mooring* 3

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Nabila Arifannisa

NRP. 4312 100 099

Disetujui oleh:

1. Nur Syahroni S.T., M.T., Ph.D. (Pembimbing 1)

2. Ir. Mas Murtedjo M. Eng (Pembimbing 2)

3. Haryo Dwito Armono S.T, M. Eng, Ph.D (Penguji 1)

4. Silvianita S.T, M.Sc, Ph.D (Penguji 2)

5. Dirta Marina Chamelia S.T., M.T. (Penguji 3)

SURABAYA, JULI 2016

ABSTRAK

ANALISIS UMUR KELELAHAN PADA *ANCHOR CHAIN SINGLE POINT MOORING 3*

Nama Mahasiswa : Nabila Arifannisa
NRP : 4312100099
Jurusan : Teknik Kelautan FTK-ITS
Dosen Pembimbing : Nur Syahroni, S.T, M.T, Ph. D
Ir. Mas Murtedjo M.Eng

Dalam tugas akhir ini penulis menganalisis umur kelelahan struktur *Anchor Chain* yang digunakan untuk menambat *Single Point Mooring (SPM) 3* ke dasar laut. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui masa operasi *Anchor Chain* dengan mempertimbangkan umur kelelahan struktur. Penelitian dimulai dengan melakukan analisis mengenai pergerakan FSO Arco Ardjuna dan SPM 3 akibat beban lingkungan dalam keadaan *free floating* dan tertambat untuk mendapatkan besar *tension* pada *anchor legs* dan *hawser*.. Setelah itu dilakukan analisis global dengan memasukkan beban *tension* dan berat struktur *Anchor Chain* berdasarkan ketentuan ABS untuk mendapatkan besar tegangan yang diterima masing-masing *Anchor Chain* yang ada. Setelah itu dilakukan perhitungan *stress range* dan menghitung *Cumulative Damage* menggunakan metode *S-N Curve* berdasarkan hukum kegagalan Palmgren Miner dengan mengestimasi kegagalan menggunakan metode *simplified fatigue analysis*. Dari hasil permodelan numerik yang dilakukan, didapatkan bahwa perilaku gerak terbesar pada SPM yaitu sebesar 3.12 deg/m untuk gerakan *roll* saat kondisi FSO muatan *full load* dan 2.98 m/m untuk gerakan *heave* kondisi FSO muatan *full load*. Untuk hasil *tension* terbesar pada *anchor legs* yaitu 684.109 kN pada *heading angle* 0° dengan *safety factor* 10.38. Setelah itu didapatkan tegangan maksimum pada struktur *Anchor Chain* sebesar 150.53 Mpa dan deformasi terbesar 1.0858 mm. Berdasarkan tegangan maksimum tersebut umur kelelahan *Anchor Chain* yaitu 94 tahun selama umur operasi.

Kata Kunci – *Anchor Chain, Damage Cumulative, Maximum Principal Stress, Stress Range, Simplified Fatigue Analysis*

ABSTRACT
FATIGUE LIFE ANALYSIS OF SINGLE POINT MOORING 3 ANCHOR
CHAIN

Name of Student : Nabila Arifannisa
REG : 4312100099
Department : Department of Ocean Engineering, Marine Technology
Faculty, ITS
Supervisors : Nur Syahroni S.T, M.T, Ph.D
Ir. Mas Murtedjo M. Eng

Fatigue life analysis is carried out in the Anchor Chain of Single Point Mooring (SPM) 3. The Anchor Chain is applied to connect the SPM into the seabed. The analysis is performed to know the operation time of the anchor chain in terms of the structure fatigue life. This case study begins with the motion analysis of FSO Arco Ardjuna and SPM 3 due to the environment load in free floating and moored condition, subsequently the tension of anchor legs and hawser can be determined due to moored condition. As well as the maximum tension of the Anchor Legs. Based on the environmental load and the tension of anchor legs, the local structure analysis of Anchor Chain was performed. The results have to comply with the requirement of ABS rules. Stress range and Cumulative Damage calculation was applied using to S-N Curve method based of Palmgren Miner's rules with estimate the cumulative damage using the method of simplified method. Based on the modelling, it is known that the maximum motion of SPM 3 is 3.12 deg/m in roll at full load condition of FSO Arco Ardjuna and 2.98 m/m in heave at the full load condition of FSO Arco Ardjuna. Based on the simulation carried out to obtain the maximum anchor legs tension obtain on chain 1 is 684.109 kN at 0° heading angle. While, the maximum stress that occurs on the analysis of the local structure of anchor chain is 150.53 Mpa and the deformation is 1.0858 mm. Based on the maximum stress, obtains the result of fatigue life of anchor chain is 94 years as long as the operation.

Kata Kunci – Anchor Chain, Damage Cumulative, Maximum Principal Stress, Stress Range, Simplified Fatigue Analysis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR.....	vi
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xv

BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	1
1.3 Tujuan Penelitian.....	1
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1 Tinjauan Pustaka.....	5
2.2 Dasar Teori	6
2.2.1 <i>Floating Storage and Offloading (FSO)</i>	6
2.2.2 <i>Single Point Mooring (SPM)</i>	7
2.2.3 <i>Mooring Line</i>	9
2.2.4 <i>Anchor Chain</i>	10
2.2.5 <i>Analisa Dinamis</i>	12
2.2.6 <i>Teori Gerak Kapal</i>	13
2.2.7 <i>Gelombang Sinusoidal</i>	13
2.2.8 <i>Pengaruh Arah Gelombang terhadap Kapal</i>	15
2.2.9 <i>Konsep Pembebanan</i>	16
2.2.9.1 <i>Beban Angin</i>	17
2.2.9.2 <i>Beban Arus</i>	18

2.2.9.3 Beban Gelombang.....	19
2.2.10 Gerakan Osilasi <i>Surge</i> Murni	19
2.2.11 Gerakan Osilasi <i>Sway</i> Murni	21
2.2.12 Gerakan Osilasi <i>Heave</i> Murni	23
2.2.13 Gerakan Osilasi <i>Roll</i> Murni.....	23
2.2.14 Gerakan Osilasi <i>Pitch</i> Murni	26
2.2.15 Gerakan Osilasi <i>Yaw</i> Murni.....	27
2.2.16 Gerakan <i>Couple Six Degree of Freedom</i>	29
2.2.17 <i>Response Amplitude Operator</i> (RAO).....	30
2.2.18 Spektra Gelombang	31
2.2.19 Spektra Respon	32
2.2.20 Penentuan <i>Mooring Line</i>	33
2.2.21 <i>Offset</i> dan <i>Tension</i> Maksimum	33
2.2.22 <i>Boundary Condition and Meshing</i>	35
2.2.23 Tegangan Maksimum Utama	36
2.2.24 Metode Perhitungan Umur Kelelahan	36
2.2.25 Kurva S-N.....	37
2.2.26 Penaksiran Umur Kelelahan Sederhana	38
 BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	 41
3.1 Diagram Alir	41
3.2 Prosedur Penelitian	43
3.3 Pengumpulan Data.....	45
 BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	 49
4.1 Pemodelan Struktur	49
4.1.1 Pemodelan FSO Arco Ardjuna	49
4.1.2 Pemodelan <i>Single Point Mooring 3</i>	50
4.2 Hidrostatik	51
4.3 Analisis Gerakan Kapal.....	53
4.4 <i>Response Amplitude Operator</i> (RAO)	55
4.5 <i>Mooring Analysis</i>	56
4.5.1 Penentuan Panjang Minimum <i>Anchor Line</i> pada SPM	56

4.5.2	Arah Pembebanan Gelombang pada <i>Mooring Analysis</i>	57
4.5.3	RAO FSO Arco Ardjuna saat tertambat	57
4.5.3.1	RAO FSO kondisi <i>Light Load</i>	58
4.5.3.2	RAO FSO kondisi <i>Full Load</i>	61
4.5.4	RAO <i>Single Point Mooring 3</i> kondisi tertambat	64
4.5.4.1	RAO kondisi FSO <i>Light Load</i>	64
4.5.4.2	RAO kondisi FSO <i>Full Load</i>	67
4.6	Spektrum Gelombang	71
4.7	Respon Spektra FSO Arco Ardjuna	72
4.7.1	Respon Spektra FSO kondisi muatan <i>light load</i>	72
4.7.2	Respon Spektra FSO kondisi muatan <i>full load</i>	75
4.8	Respon Spektra <i>Single Point Mooring (SPM) 3</i>	78
4.8.1	Respon Spektra SPM 3 ketika muatan FSO <i>Light Load</i>	79
4.8.2	Respon Spektra SPM 3 ketika muatan FSO <i>Full Load</i>	82
4.9	Analisis <i>Tension</i> pada <i>Mooring Line</i>	85
4.10	Permodelan Struktur <i>Anchor Chain</i>	88
4.10.1	Analisis perbandingan ukuran <i>chain</i>	90
4.11	<i>Sensitivity Meshing Analysis</i>	93
4.12	Pembebanan pada ANSYS Mechanical	94
4.13	Analisis Tegangan pada Struktur <i>Anchor Chain</i>	96
4.14	Analisis Umur Kelelahan pada Struktur <i>Anchor Chain</i>	98
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	101
5.1	Kesimpulan	101
5.2	Saran	101
DAFTAR PUSTAKA	103
LAMPIRAN		
BIODATA PENULIS		

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Parameter Kurva S-N untuk <i>Chain</i>	37
Tabel 3.1. <i>Principal dimension</i> FSO Arco Ardjuna	45
Tabel 3.2. <i>Principal dimension</i> CALM buoy SPM 3	45
Tabel 3.3. Spesifikasi teknis <i>mooring hawser</i>	45
Tabel 3.4. Spesifikasi teknis <i>anchor legs</i> SPM 3	46
Tabel 3.5. Data lingkungan perairan Laut Jawa	47
Tabel 3.6. Data Kejadian Gelombang Laut Jawa	47
Tabel 4.1. <i>Principal Dimension</i> FSO Arco Ardjuna	49
Tabel 4.2. <i>Pricipal Dimension</i> SPM 3	50
Tabel 4.3. Data Hidrostatik FSO Arco Ardjuna kondisi <i>full load</i>	52
Tabel 4.4. Data Hidrostatik FSO Arco Ardjuna kondisi <i>light load</i>	52
Tabel 4.5. Koreksi hidrostatik FSO Arco Ardjuna hasil luaran Maxsurf <i>light load</i>	52
Tabel 4.6. Koreksi hidrostatik FSO Arco Ardjuna hasil luaran Maxsurf <i>full load</i>	53
Tabel 4.7. Koreksi hidrostatik SPM 3	53
Tabel 4.8. Data Lingkungan	54
Tabel 4.9. RAO Maksimum kondisi muatan <i>light load</i>	71
Tabel 4.10. RAO Maksimum kondisi muatan <i>full load</i>	71
Tabel 4.11. Analisis <i>tension</i> maksimum pada <i>mooring line</i> kondisi FSO <i>light load</i>	87
Tabel 4.12. Analisis <i>tension</i> maksimum pada <i>mooring line</i> kondisi FSO <i>full load</i>	87
Tabel 4.13. Hasil analisis <i>tension</i> maksimum <i>hawser</i> kondisi FSO <i>light load full load</i>	87
Tabel 4.14. Data diameter <i>chain</i>	89
Tabel 4.15. Tabulasi hasil <i>maximum principal stress</i> untuk variasi meshing	94
Tabel 4.16. Pembebanan pada analisis tegangan lokal <i>anchor chain</i>	95
Tabel 4.17. Perhitungan <i>stress range</i>	99
Tabel 4.18. Umur kelelahan <i>achor chain</i> akibat beban siklis	100

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 <i>Single Point Mooring 3</i>	1
Gambar 1.2 <i>Anchor Chain System</i>	2
Gambar 2.1 <i>FSO Arco Ardjuna</i>	6
Gambar 2.2 <i>Catenary Anchor Leg Mooring</i>	7
Gambar 2.3 Sistem CALM pada SPM 3	9
Gambar 2.4 <i>FSO Arco Ardjuna</i> saat tertambat di SPM 3	9
Gambar 2.5 <i>Anchor Chain System</i>	10
Gambar 2.6 <i>Mooring Anchor Chain System</i>	11
Gambar 2.7 Moda gerak struktur apung	13
Gambar 2.8 Gelombang sinusoidal	14
Gambar 2.9 Vektor dari <i>simple harmonic motion</i>	14
Gambar 2.10 Pengaruh arah gelombang terhadap kapal.	15
Gambar 2.11 Ilustrasi gerakan <i>Surging</i>	19
Gambar 2.12 Ilustrasi gerakan <i>Swaying</i>	21
Gambar 2.13 Ilustrasi gerakan <i>Heaving</i>	23
Gambar 2.14 Ilustrasi gerakan <i>Rolling</i>	24
Gambar 2.15 Ilustrasi gerakan <i>Pitching</i>	26
Gambar 2.16 Ilustrasi gerakan <i>Yawing</i>	28
Gambar 2.17 Panjang Minimum <i>Mooring Line</i>	33
Gambar 2.18 Contoh <i>Meshing</i> pada konfigurasi <i>chain</i>	36
Gambar 2.19 Kurva S-N untuk <i>Chain</i>	38
Gambar 3.1 Diagram Alir	41
Gambar 3.1 Diagram Alir (Lanjutan)	42
Gambar 3.2 <i>Anchor Legs</i> dan <i>Pattern Definition (Top View)</i>	46
Gambar 4.1 General Arrangement FSO Arco Ardjuna	49
Gambar 4.2 Permodelan FSO Arco Ardjuna menggunakan Maxsurf	50
Gambar 4.3 Permodelan SPM 3 menggunakan Maxsurf	51
Gambar 4.4 Permodelan SPM 3 menggunakan AutoCAD 3D	51
Gambar 4.5 Permodelan FSO Arco Ardjuna kondisi <i>free floating</i>	55
Gambar 4.6 Permodelan FSO Arco Ardjuna kondisi tertambat	55
Gambar 4.7 Panjang minimum <i>mooring line</i>	56

Gambar 4.8 Arah pembebanan gelombang pada <i>mooring analysis</i>	57
Gambar 4.9 Arah pembebanan gelombang pada <i>mooring analysis</i>	57
Gambar 4.10 Grafik RAO Translasi FSO <i>light load</i> Arah 0	58
Gambar 4.11 Grafik RAO Rotasi FSO <i>light load</i> Arah 0.....	58
Gambar 4.12 Grafik RAO Translasi FSO <i>light load</i> Arah 90	59
Gambar 4.13 Grafik RAO Rotasi FSO <i>light load</i> Arah 90.....	59
Gambar 4.14 Grafik RAO Translasi FSO <i>light load</i> Arah 180	60
Gambar 4.15 Grafik RAO Rotasi FSO <i>light load</i> Arah 180.....	60
Gambar 4.16 Grafik RAO Translasi FSO <i>full load</i> Arah 0	61
Gambar 4.17 Grafik RAO Rotasi FSO <i>full load</i> Arah 0.....	61
Gambar 4.18 Grafik RAO Translasi FSO <i>full load</i> Arah 90	62
Gambar 4.19 Grafik RAO Rotasi FSO <i>full load</i> Arah 90.....	62
Gambar 4.20 Grafik RAO Translasi FSO <i>full load</i> Arah 180	63
Gambar 4.21 Grafik RAO Rotasi FSO <i>full load</i> Arah 180.....	63
Gambar 4.22 Grafik RAO Translasi SPM Arah 0 kondisi FSO <i>light load</i>	64
Gambar 4.23 Grafik RAO Rotasi SPM Arah 0 kondisi FSO <i>light load</i>	65
Gambar 4.24 Grafik RAO Translasi SPM Arah 90 kondisi FSO <i>light load</i>	65
Gambar 4.25 Grafik RAO Rotasi SPM Arah 90 kondisi FSO <i>light load</i>	66
Gambar 4.26 Grafik RAO Translasi SPM Arah 180 kondisi FSO <i>light load</i>	66
Gambar 4.27 Grafik RAO Rotasi SPM Arah 180 kondisi FSO <i>light load</i>	67
Gambar 4.28 Grafik RAO Rotasi SPM Arah 0 kondisi FSO <i>full load</i>	67
Gambar 4.29 Grafik RAO Rotasi SPM Arah 0 kondisi FSO <i>full load</i>	68
Gambar 4.30 Grafik RAO Translasi SPM Arah 90 kondisi FSO <i>full load</i>	68
Gambar 4.31 Grafik RAO Rotasi SPM Arah 90 kondisi FSO <i>full load</i>	69
Gambar 4.32 Grafik RAO Translasi SPM Arah 180 kondisi FSO <i>full load</i>	69
Gambar 4.33 Grafik RAO Rotasi SPM Arah 180 kondisi FSO <i>full load</i>	70
Gambar 4.34 Spektrum Gelombang JONSWAP Perairan Laut Jawa	71
Gambar 4.35 Grafik Respon Spektra Translasi FSO <i>light load</i> Arah 0	72
Gambar 4.36 Grafik Respon Spektra Rotasi FSO <i>light load</i> Arah 0.....	73
Gambar 4.37 Grafik Respon Spektra Translasi FSO <i>light load</i> Arah 90	73
Gambar 4.38 Grafik Respon Spektra Rotasi FSO <i>light load</i> Arah 90.....	74
Gambar 4.39 Grafik Respon Spektra Translasi FSO <i>light load</i> Arah 180	74
Gambar 4.40 Grafik Respon Spektra Rotasi FSO <i>light load</i> Arah 180.....	75

Gambar 4.41 Grafik Respon Spektra Translasi FSO <i>full load</i> Arah 0	75
Gambar 4.42 Grafik Respon Spektra Rotasi FSO <i>full load</i> Arah 0	76
Gambar 4.43 Grafik Respon Spektra Translasi FSO <i>full load</i> Arah 90	76
Gambar 4.44 Grafik Respon Spektra Rotasi FSO <i>full load</i> Arah 90	77
Gambar 4.45 Grafik Respon Spektra Translasi FSO <i>full load</i> Arah 180	77
Gambar 4.46 Grafik Respon Spektra Rotasi FSO <i>full load</i> Arah 180	78
Gambar 4.47 Grafik Respon Spektra Translasi SPM Arah 0 kondisi FSO <i>light load</i>	79
Gambar 4.48 Grafik Respon Spektra Rotasi SPM Arah 0 kondisi FSO <i>light load</i>	79
Gambar 4.49 Grafik Respon Spektra Translasi SPM Arah 90 kondisi FSO <i>light load</i>	80
Gambar 4.50 Grafik Respon Spektra Rotasi SPM Arah 90 kondisi FSO <i>light load</i>	80
Gambar 4.51 Grafik Respon Spektra Translasi SPM Arah 180 kondisi FSO <i>light load</i>	81
Gambar 4.52 Grafik Respon Spektra Rotasi SPM Arah 180 kondisi FSO <i>light load</i>	81
Gambar 4.53 Grafik Respon Spektra Rotasi SPM Arah 0 kondisi FSO <i>full load</i>	82
Gambar 4.54 Grafik Respon Spektra Rotasi SPM Arah 0 kondisi FSO <i>full load</i>	82
Gambar 4.55 Grafik Respon Spektra Translasi SPM Arah 90 kondisi FSO <i>full load</i>	83
Gambar 4.56 Grafik Respon Spektra Rotasi SPM Arah 90 kondisi FSO <i>full load</i>	83
Gambar 4.57 Grafik Respon Spektra Translasi SPM Arah 180 kondisi FSO <i>full load</i>	84
Gambar 4.58 Grafik Respon Spektra Rotasi SPM Arah 180 kondisi FSO <i>full load</i>	84
Gambar 4.59 Permodelan pada <i>software</i> Ansys Aqwa tampak samping	86
Gambar 4.60 Kriteria perancangan <i>Joining shackle</i> berdasarkan ABS	89
Gambar 4.61 Kriteria perancangan <i>Studless link</i> berdasarkan ABS	89
Gambar 4.62 Permodelan 3D struktur lokal <i>anchor chain</i> tampak atas	90
Gambar 4.63 Permodelan 3D struktur lokal <i>anchor chain</i> tampak samping	90
Gambar 4.64 Permodelan 3D struktur lokal <i>anchor chain</i> pada Ansys Mechanical	90
Gambar 4.65 Permodelan lokal <i>chain</i> dengan satu <i>shackle</i> dan dua mata rantai	91
Gambar 4.66 Permodelan lokal <i>chain</i> dengan satu <i>shackle</i> dan empat mata rantai	91
Gambar 4.67 Permodelan lokal <i>chain</i> dengan satu <i>shackle</i> dan delapan mata rantai	91

Gambar 4.68 Pengaturan jumlah <i>segment</i> pada Orcaflex	92
Gambar 4.69 Permodelan konfigurasi sistem tambat pada Orcaflex.....	93
Gambar 4.70 <i>Meshing</i> struktur <i>anchor chain</i>	93
Gambar 4.71 Sensitivitas <i>meshing</i> pada model struktur SPM.....	94
Gambar 4.72 Konfigurasi tambat FSO Arco Ardjuna	95
Gambar 4.72 Beban berat struktur	96
Gambar 4.73 Beban tension.....	96
Gambar 4.74 <i>fixed support</i>	96
Gambar 4.75 Deformasi pada <i>anchor chain</i>	97
Gambar 4.76 <i>Maximum Principal Stress</i> pada <i>anchor chain</i>	97
Gambar 4.77 Letak tegangan terbesar pada <i>anchor chain</i>	98
Gambar 4.78 Contoh pembagian segmen permodelan <i>anchor chain</i>	98
Gambar 4.78 Perhitungan akumulasi kegagalan.....	99

DAFTAR SIMBOL

V_c	= Kecepatan arus desain (m/sec)
F_w	= gaya angin (N)
C_s	= koefisien bentuk
ρ_a	= massa jenis udara (kg/m^3)
A	= luas area vertikal yang terkena angin (m^2)
V_C	= kecepatan partikel air (m/s)
V_w	= kecepatan angin, knots (m/s)
V_{10}	= kecepatan angin pada ketinggian 10 m, knots (m/s)
y	= ketinggian dimana kecepatan angin dihitung, (m)
x	= faktor eksponen
ξ	= Parameter bentuk dengan harga umum antara 0,75 s.d. 2,0, sedangkan untuk gelombang laut umumnya berkisar 0,9 s.d. 1.1.
ξ	= Parameter skala yang harganya tergantung dari harga ekstrim variabel x
x	= Intensitas objek/ parameter yang ditinjau, misalnya tinggi gelombang sehingga $x=H$
\mathbf{M}_{jk}	= matriks massa dan momen inersia massa bangunan laut,
\mathbf{A}_{jk}	= matriks koefisien-koefisien massa tambah hidrodinamik,
\mathbf{B}_{jk}	= matriks koefisien-koefisien redaman hidrodinamik,
\mathbf{K}_{jk}	= matriks koefisien-koefisien kekakuan atau gaya dan momen hidrostatik,
16	
\mathbf{F}_j	= matriks gaya eksitasi(F_1, F_2, F_3) dan momen eksitasi(F_4, F_5, F_6) dalam fungsi kompleks (dinyatakan oleh $e^{i\omega t}$),
F_1	= gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan <i>surge</i> (N)
F_2	= gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan <i>sway</i> (N)
F_3	= gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan <i>heave</i> (N)
F_4	= momen eksitasi yang menyebabkan gerakan <i>roll</i> (N.m)
F_5	= momen eksitasi yang menyebabkan gerakan <i>pitch</i> (N.m)
F_6	= momen eksitasi yang menyebabkan gerakan <i>yaw</i> (N.m)
Ξ	= elevasi gerakan pada mode ke k ,

ζ	= elevasi kecepatan gerak pada mode ke k ,
$\ddot{\zeta}$	= elevasi percepatan gerak pada mode ke k .
ω_p	= frekuensi puncak spektra (<i>spectral peak frequency</i>)
γ	= parameter puncak (<i>peakedness parameter</i>)
τ	= parameter bentuk (<i>shape parameter</i>)
α	= $0,0076 (X_o)^{-0,22}$, apabila X_o tidak diketahui maka $\alpha = 0,0081$
T_p	= periode puncak spektra (s)
H_s	= tinggi gelombang signifikan (m)
m_o	= Luasan dibawah kurva spektrum (zero moment)
T	= lama kejadian badai (<i>storm propagation</i>) = 3 jam
α	= kemungkinan kejadian yang tidak terjadi pada saat perancangan (1% - 5%)
m_2	= Momen Spektra kecepatan
l	= panjang minimum dari <i>chain line</i> (m)
h	= $h_m + h_c$
h_m	= kedalaman air (m)
h_c	= tinggi <i>fairlead</i> diatas permukaan air (m)
p	= berat <i>chain line</i> didalam air persatuan panjang (T/m)
F_H	= gaya horizontal <i>chain line</i> pada <i>fairlead</i> (N)
T	= <i>tension</i> dari chain line pada <i>fairlead</i> (N)
D	= <i>length resting on the seabed</i> (m)
T_{mean}	= <i>mean tension</i>
T_{max}	= <i>maximum tension</i>
T_{wfmax}	= <i>maximum wave frequency tension</i>
T_{wfsig}	= <i>significant wave frequency tension</i>
T_{lfmax}	= <i>maximum low-frequency tension</i>
T_{lfsig}	= <i>significant low-frequency tension</i>
N	= Number of cycles
R	= <i>Ratio of tension range</i>
Γ	= Gamma
T_i	= waktu dalam 1 tahun (s)

- P_i = peluang kejadian kondisi lingkungan i
- n_i = Jumlah *cycle* kolom interval rentangan tegangan i .
- N_i = Jumlah *cycle* untuk gagal pada perhitungan tegangan yang sama

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A Data Struktur dan *Drawing*

LAMPIRAN B Hasil *Input* dan *Output Ansys AQWA*

LAMPIRAN C *Mooring System* (ORCAFLEX)

LAMPIRAN D Hasil *Output Ansys Mechanical*

LAMPIRAN E Perhitungan *Damage Cumulative*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses perancangan struktur bangunan lepas pantai merupakan proses yang cukup rumit sehingga harus mempertimbangkan banyak faktor. Hal tersebut dilakukan agar menjamin struktur yang akan dibangun mampu memenuhi fungsinya dan dapat bertahan sesuai umur operasi yang diinginkan.

Kerusakan pada bangunan lepas pantai seringkali diakibatkan oleh kelelahan (*fatigue*) pada struktur, baik pada bagian konstruksi maupun struktur itu sendiri. *Fatigue* pada struktur masih menjadi penyebab mayoritas kerusakan pada bangunan laut termasuk struktur SPM. *Fatigue* dipengaruhi beban siklis yang secara terus-menerus diterima konstruksi maupun struktur selama beroperasi. Perkiraan umur kelelahan dilakukan berdasar pada fluktuasi beban yang akan diterima struktur selama masa operasinya. Beban yang diterima bangunan laut lebih didominasi oleh beban gelombang sehingga menyebabkan bangunan laut mempunyai kecenderungan lebih tinggi untuk mengalami kelelahan, selain itu faktor operasi pada tingkat tertentu menambah beban siklis sehingga struktur menjadi bertambah kritis (Djarmiko, 2003).

Single Point Mooring (SPM) merupakan fasilitas tambat atau terminal untuk *loading* dan menyalurkan produk seperti minyak, gas bumi atau air di lepas pantai dari dan ke *vessel*. SPM memungkinkan kapal kargo untuk bertambat sekaligus mengisi muatan atau menurunkan muatan dengan kapal induknya mengikuti arah angin, ataupun gelombang laut. SPM dapat diaplikasikan di laut dangkal maupun laut dalam.

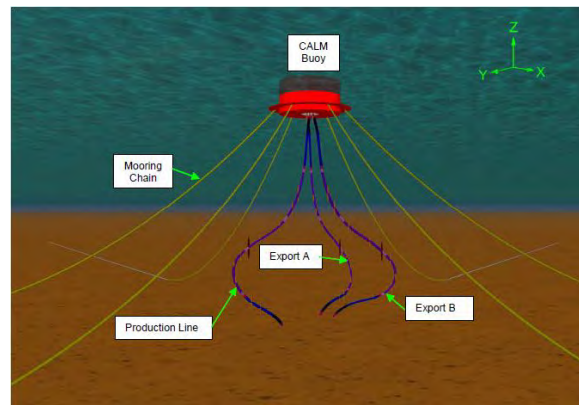


Gambar 1.1. Single Point Mooring 3 (Sumber : PT. PHE ONWJ)

SPM membantu proses penyaluran hasil produksi (Operasi *lifting*) yang

merupakan salah satu aktifitas yang dilakukan terus-menerus dan menimbulkan beban siklis pada struktur SPM. Struktur SPM ditambat menggunakan rantai jangkar ke dasar laut agar mampu mempertahankan posisinya dalam proses operasi.

Secara langsung rantai jangkar merupakan bagian konstruksi yang akan mendapatkan beban siklis baik beban statis maupun dinamis. Umumnya beban yang mengenai konstruksi rantai jangkar adalah beban dari rantai dan SPM sendiri, serta beban dinamis yang berasal dari beban siklis operasional dari SPM berupa beban gelombang dan angin, serta beban arus yang mengenai rantai jangkar sehingga konstruksi rantai akan rentan terhadap kelelahan karena beban-beban tersebut. Konfigurasi *mooring line* yang terdapat pada SPM yang dianalisa tampak pada Gambar 1.2



Gambar 1.2. Anchor Chain System (Sumber : PT. PHE ONWJ)

Sehingga berdasarkan latar belakang tersebut, maka pada tugas akhir ini akan dibahas mengenai analisa *fatigue* pada konstruksi *Anchor Chain* SPM 3 yang beroperasi di Ardjuna Marine Terminal. SPM 3 yang digunakan pada analisis ini tampak pada Gambar 1.1

1.2 Perumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik respon struktur yang terjadi pada FSO Arco Ardjuna dan *Single Point Mooring* (SPM) akibat beban gelombang?
2. Berapa tegangan tertinggi yang diterima *Anchor Chain* pada SPM?
3. Berapa umur struktur (*fatigue life*) *Anchor Chain* pada SPM?

1.3 Tujuan

1. Menghitung karakteristik respon struktur yang terjadi pada FSO Arco Ardjuna dan *Single Point Mooring* (SPM) akibat beban gelombang.

2. Menghitung nilai tegangan tertinggi yang diterima *Anchor Chain* pada SPM
3. Menghitung umur struktur (*fatigue life*) *Anchor Chain* pada SPM

1.4 Manfaat

1. Identifikasi beban-beban yang mempengaruhi umur kelelahan (*fatigue life*) dari *Anchor Chain* pada SPM.
2. Dapat mengetahui besarnya pengaruh beban siklis dan beban operasional terhadap umur kelelahan (*fatigue life*) dari *Anchor Chain* pada SPM
3. Prosedur dan hasil perhitungan dapat dijadikan dasar dalam merancang *Anchor Chain* pada SPM dengan pertimbangan beban-beban yang berpengaruh
4. Hasil perhitungan dapat dijadikan dasar pada saat inspeksi atau reassessment kekuatan *Anchor Chain* pada SPM.

1.5 Batasan Masalah

1. Penelitian ini merupakan studi kasus pada Ardjuna Marine Terminal PT. Pertamina Hulu Energi ONWJ
2. *Single Point Mooring* yang ditinjau dalam Tugas Akhir ini adalah SPM 3 tipe CALM (*Turntable Buoy Mooring*) yang beroperasi di field Ardjuna Terminal PT. Pertamina Hulu Energi ONWJ
3. Beban yang ditinjau adalah beban akibat gelombang, beban angin serta beban arus yang terjadi di Ardjuna Marine Terminal.
4. Beban gelombang, angin dan arus yang ditinjau adalah beban operasi 1 tahunan.
5. *Heading* pembebanan yang ditinjau adalah pada *heading angle* 0° , 90° , dan 180° .
6. Validasi hidrostatik model yang dilakukan pada FSO Arco Ardjuna diasumsikan pada kondisi *full load* dan *light load*.
7. Permodelan dan pergerakan *subsea hose* dan *floating hose* diabaikan.
8. Jenis dan penyambungan pada *chain line* diasumsikan tersambung dengan baik dan tanpa cacat.
9. Kedalaman laut di *field* Ardjuna Terminal adalah 45 m.
10. Gesekan antar *Chain* diabaikan
11. Kondisi pasang surut perairan Ardjuna Terminal diabaikan

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Dalam bab ini dijelaskan mengenai latar belakang penelitian yang akan dilaksanakan, perumusan masalah dan tujuan yang ingin dicapai serta batasan-batasan masalah yang menjadi batasan acuan pengerjaan tugas akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Bab II berisi tinjauan pustaka dan dasar teori yang menjadi acuan dari penelitian tugas akhir ini. Penelitian dan tugas akhir sebelumnya yang pernah membahas topik yang berkesinambungan dengan penelitian yang akan dilakukan, dijelaskan secara terangkum untuk menjadi dasar pengembangan penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab III menjelaskan mengenai langkah-langkah pelaksanaan penelitian dan data-data yang telah didapatkan penulis untuk memulai penelitian

BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini, penulis membahas seluruh hasil dari penelitian yang dilaksanakan dan pencapaian hasil dari pelaksanaan prosedur penelitian. Penulis membahas mengenai permodelan yang dilakukan hingga hasil analisis yang telah dilakukan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada Bab ini, penulis menyampaikan hasil pencapaian dari perumusan masalah yang telah dijawab secara terangkum untuk menggambarkan ketercapaian hasil penelitian serta saran untuk pengembangan tugas akhir dan penelitian selanjutnya baik yang akan terkait maupun tidak terhadap hasil penelitian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam proses perancangan bangunan lepas pantai, perancang harus mampu memastikan struktur dapat bertahan selama waktu operasi yang direncanakan. Hal tersebut berkaitan erat dengan memperhitungkan beban-beban yang akan diterima sehingga menyebabkan struktur mengalami kegagalan.

Struktur yang sedang beroperasi tidak hanya menerima beban statis dari berat struktur sendiri, tetapi juga akan menerima beban dinamis yang berasal dari proses operasi seperti beban siklis yang berasal dari lingkungan sehingga perancang harus memperhitungkan berapa besar beban yang mampu diterima struktur dan memperkirakan berapa lama struktur mampu bertahan.

Menurut Soedjono (1989), fenomena kerusakan ataupun berkurangnya kekuatan struktur akibat beban-beban, terutama beban siklis, dikenal dengan kelelahan struktur (*fatigue*), dan secara esensial ditandai dengan keretakan (*crack*) dan pada proses selanjutnya terjadi penjaralan (*propagation*) serta kerusakan (*failure*).

Menurut Wirsching (1988), bangunan lepas pantai cenderung mengalami kelelahan karena beban lingkungan yang bekerja didominasi oleh gelombang yang bersifat siklis, sehingga kelelahan adalah penyebab utama kerusakan pada bangunan lepas pantai, di mana struktur merespon secara dinamis gelombang acak serta beban angin. Disamping itu faktor-faktor operasi lain pada tingkat tertentu juga dapat menambah beban siklis ini, sehingga keadaan struktur bertambah kritis (Djarmiko, 2003). Seperti penelitian yang dilakukan oleh Sadat dan Mohammad (2012). Penelitian dilakukan pada *scantling support structure accommodation module* FSO Cinta Natomas. Beban siklis dari gelombang dan angin diakumulasi dari beban terendah sampai dengan tertinggi selama satu tahun. Hasil analisa dalam penelitian menunjukkan kontribusi beban terhadap umur kelelahan *scantling support module* FSO Cinta Natomas berturut-turut dari yang terbesar.

Gerakan pada bangunan apung yang berlebihan, terutama akibat beban lingkungan yang ekstrem, dapat mengakibatkan kegagalan sistem. (Sabana, 2012). Seperti penelitian dari (Thies et.al) yang menggunakan *floating marine energy converters* sebagai objek, dimana pada bagian *mooring line* dilakukan evaluasi kerusakan kelelahan (*fatigue*) dan memprediksi berapa lama struktur tersebut dapat bertahan.

Penelitian mengenai analisis umur kelelahan pada struktur Calm Buoy FSO Arco Ardjuna secara global telah dilakukan oleh Pratama (2015). Analisis ini dilakukan dengan mengidentifikasi karakteristik respon struktur pada FSO Arco Ardjuna dan SPM akibat beban gelombang saat kondisi *free floating* dan tertambat.

Penelitian selanjutnya mengenai analisis umur kelelahan struktur juga dilakukan oleh Hamzah (2016) pada konstruksi *Crane Pedestal* FSO Arco Ardjuna.

Diperlukan adanya penelitian lebih lanjut terkait kegagalan yang sering terjadi pada struktur. Hal tersebut penting untuk mengantisipasi kerusakan yang terjadi pada bangunan laut agar menghindari kecelakaan pada proses kerja yang dapat menyebabkan jatuhnya korban jiwa.

Dalam tugas akhir ini, penulis akan menganalisa pengaruh beban yang terjadi pada struktur *Anchor Chain* SPM 3 dan mengetahui letak sambungan kritis struktur sehingga diharapkan kedepannya dapat dijadikan dasar dalam inspeksi dan modifikasi serta kelanjutan pengerjaan jurnal dan tugas akhir mengenai kegagalan kelelahan (*fatigue*).

2.2 Dasar Teori

2.2.1 FSO (*Floating Storage and Offloading System*)

FSO diartikan sebagai struktur terapung yang berfungsi sebagai penyimpan dan penyalur minyak dan gas bumi tanpa dilengkapi dengan fasilitas pemrosesan. Didalam *OCIMF, Chapter Tandem Mooring Offloading Guidelines for CTs at F(P)SO Facilities*, FSO dan FPSO memiliki fungsi yang sama, akan tetapi minyak bumi atau gas tidak diproses di kapal. FSO Arco Ardjuna merupakan salah satu aset yang dimiliki oleh PT. PHE ONWJ. Tampak FSO Arco Ardjuna saat tertambat pada SPM di Gambar 2.1



Gambar 2.1 FSO Arco Ardjuna (Sumber : PT. PHE ONWJ)

2.2.2 SPM (*Single Point Mooring*)

Single Point Mooring merupakan suatu sistem terminal di lepas pantai yang memiliki 2 fungsi utama yaitu sebagai tempat tambat atau *Mooring* dan sebagai media penyalur perpindahan suatu kargo dari dan ke suatu struktur terapung. Menurut API RP 2SK (1996) *Single point mooring* dapat dibagi menjadi *catenary anchor leg mooring (CALM)*, *Turret mooring*, dan *Single Anchor Leg Mooring (SALM)*. Pada perkembangannya, dikenal SPM tipe *taut*. Perbedaan antara CALM dan taut adalah jangkar pada tipe CALM menyentuh dasar laut dalam posisi horizontal, sedangkan tipe taut dalam keadaan membentuk sudut. Material pada tipe taut memiliki bobot yang lebih ringan dibanding material pada tipe CALM.

a. CALM (*Catenary Anchor Leg Mooring*)

Terdiri atas sebuah buoy (objek terapung) dengan empat atau lebih rantai pengikat hingga ke dasar laut. Tipe ini memiliki *mooring line* yang tergelar di dasar laut (Roowei, 2006). *Mooring line* akan menerima *tension* yang berasal dari beban lingkungan dan beban akibat struktur apung yang ditambatkan serta dari berat material *mooring line* itu sendiri. CALM merupakan tipe SPM yang digunakan PT. PHE ONWJ seperti tampak pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 *Catenary Anchor Leg Mooring (CALM)* (PT.PHE ONWJ)

b. *Turret Mooring*

c. SALM (*Single Anchor Leg Mooring*)

Sistem *Single Point Mooring* terbagi atas empat bagian, yaitu tubuh pelampung, *mooring* (tambat atau elemen penahan), sistem transfer dan komponen lainnya. Semua bagian ini sama-sama penting.

a. Tubuh pelampung

b. *Mooring* (Tambat atau Elemen Penahan)

Mooring berfungsi menahan pelampung di dasar laut. Komponen *mooring* terbagi atas:

1. Jangkar , untuk menghubungkan tambatan ke dasar laut
2. Rantai jangkar
3. *Chainstoppers*, untuk menghubungkan rantai pada pelampung

c. Tambang kapal, sebuah kapal *tanker* ditambatkan ke sebuah pelampung dengan menggunakan tambang kapal.

d. Sistem transfer

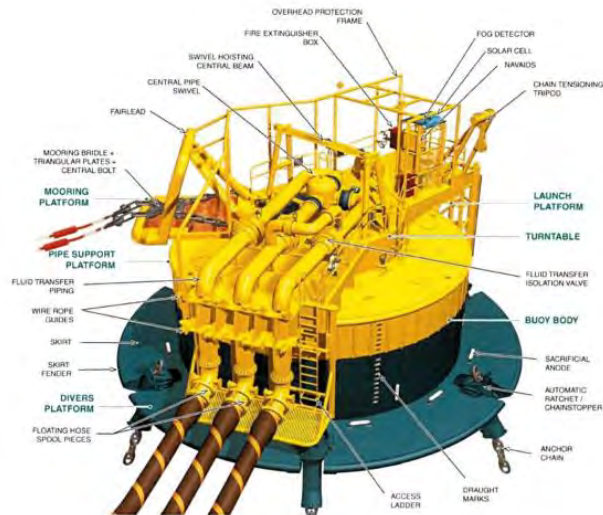
Fungsi masing-masing pelampung adalah sebagai sistem transfer. Komponen sistem transfer produksi dari dasar laut adalah

1. *Flexible Subsea Hoses*
2. *Floating Hose*
3. *Swivel*
4. *Valves* (katup)
5. *Piping* (pipa)

e. Komponen Lainnya

1. Sebuah *landing* perahu yang menyediakan akses ke geladak pelampung dari kapal *tanker*
2. *Fendering* untuk melindungi pelampung
3. *Toolkit* untuk penanganan penanganan material yang rusak
4. Navigasi maritim
5. Sebuah subsistem listrik untuk memungkinkan operasi katup dan navigasi atau peralatan lainnya

Pada tugas akhir ini dilakukan analisis menggunakan *single point mooring* (SPM) tipe *catenary anchor leg mooring* (CALM) yang bernama SPM 3 milik PT. PHE ONWJ. Sistem CALM pada SPM 3 milik PT. PHE ONWJ tampak seperti Gambar 2.3 dibawah ini.



Gambar 2.3 Sistem CALM pada SPM 3 (Sumber: PT. PHE ONWJ, 2011)



Gambar 2.4 FSO Arco Ardjuna saat tertambat di SPM 3 (PT. PHE ONWJ)

2.2.3. *Mooring Line*

Berdasarkan *API-RP2P* (2001) dan *API-RP2SK 3rd edition* (2005), tipe *mooring line* yang digunakan pada *floating structure* dibagi menjadi 3 kategori, yaitu:

1. Semua *mooring line* terbuat dari tali kabel (*wire rope*). *Wire rope* lebih ringan daripada rantai. Karena itu, pada umumnya *wire rope* memiliki *restoring force* yang lebih di perairan laut dalam dan memerlukan tegangan awal (*pretension*) yang rendah dari pada rantai. Bagaimanapun juga, untuk menghindari terangkatnya *anchor* dari dasar laut maka diperlukan *wire rope* yang sangat panjang. Rusak yang disebabkan oleh abrasi antara *wire rope* dengan dasar laut yang keras terkadang dapat menjadi suatu masalah. Terlebih lagi *wire rope* memerlukan perawatan yang sangat hati-hati. Korosi yang diakibatkan oleh kurangnya pelumasan atau kerusakan mekanik pada *wire rope* dapat menyebabkan lebih banyak kegagalan.

2. Semua *mooring line* terbuat dari *chain*. Rantai telah menunjukkan keunggulannya pada *offshore operations*. Rantai juga memiliki daya tahan yang lebih terhadap abrasi dasar laut dan memiliki kontribusi terhadap daya cengkram *anchor* yang sangat signifikan.
3. Kombinasi antara *chain* dan *wire rope*. Dengan pemilihan panjang yang tepat dari gabungan antara *wire rope* dan *chain*, maka akan diperoleh system *mooring* yang menguntungkan, yaitu: *pretension* yang rendah, *restoring force* yang tinggi dan *holding anchor* yang lebih besar dan daya tahan terhadap abrasi dasar laut yang bagus. Hal tersebut membuat sistem ini cocok digunakan pada operasi laut dalam.

2.2.4. *Anchor Chain*

Mooring leg dan *Anchor* dari sebuah SPM dirancang untuk perlindungan terhadap kegagalan *buoy* atau *hose* bekerja ketika terjadi kerusakan pada satu *anchor line* akibat beban lingkungan tertentu. *Anchor Chain* dirancang untuk memiliki daya ikat yang memadai.

Anchor Chain terdiri dari beberapa bagian panjang rantai yang dinamakan *length* atau segel. Setiap *length* atau segel rantai akan disambung satu dengan yang lain serta pada ujungnya terpasang jangkar dan pada ujung yang dikapal terpasang pada *Chain Locker*. Tampak contoh susunan *anchor chain* pada Gambar 2.5

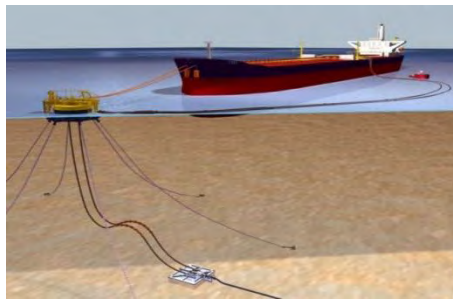


Gambar 2.5 Anchor Chain System

Panjang setiap *length*/segel rantai oleh klasifikasi ada yang ditentukan 27,45 m dan ada yang 25 m. Klasifikasi Jerman GL menentukan panjang satu segel adalah 25 m yang juga digunakan oleh Biro Klasifikasi Indonesia. Pada saat ini sesuai dengan ketentuan yang ada 1 segel atau *length* adalah 27,50 m.

Setiap segel rantai terdiri dari rangkaian mata rantai, setiap mata rantai memiliki *stud link* yaitu pada mata rantai terdapat *stud* atau dam

ditengahnya yang berfungsi memperkuat mata rantai dan menahan supaya mata rantai tidak berputar, mata rantai dikedua ujung setiap segel tidak memiliki stud atau dam dan berukuran diameter lebih besar 10 %. Jumlah mata rantai pada setiap segel memiliki jumlah ganjil supaya ujung-ujung sambungan memiliki posisi yang sama dan kedudukan rata. Pada ujung segel akan disambungkan dengan *length*/segel rantai yang berikutnya, atau untuk ujung daerah jangkar akan disambung dengan perantara *swivel* jangkar, dan pada ujung yang dikapal akan dikaitkan pada bak rantai (*chain locker*). Penyambung *length*/segel rantai menggunakan mata rantai khusus yang biasanya menggunakan segel kenter.



Gambar 2.6 *Mooring Anchor Chain System* (PT. PHE ONWJ)

Untuk Sistem *mooring* dengan *Anchor Chain*, Kapasitas setiap *chain line* akan ditentukan menggunakan karakteristik tanah dari sampel yang ada dan disesuaikan dengan kondisi dasar laut serta beban desain maksimum *Anchor Chain*. Contoh salah satu *Mooring anchor system* tampak pada Gambar 2.6 diatas.

Safety factor didefinisikan sebagai kapasitas minimum *holding* dari *anchor* dibagi beban desain jangkar maksimum. Diperlukan *Safety factor minimum*, yang diberikan tergantung pada apakah sistem *mooring* dianggap utuh atau rusak dan bagaimana beban desain dihitung. *Safety factor minimum* dapat didasarkan pada ketika sistem *mooring* dianggap utuh dan beban desain dihitung sesuai, maka diperlukan *Safety factor minimum* dimana untuk *Load Case* desain beban operasi 2.0 dan untuk *Load Case* beban lingkungan 1.0

2.2.5. Analisis Dinamis

Analisis dinamis memperhitungkan respon dinamis dari tali tambat. Efek variasi waktu akibat massa tali tambat, redaman, dan percepatan relatif fluida disertakan. Dalam pendekatan ini, gerakan *fairlead* variasi waktu dihitung dari gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *pitch*, *roll* dan *yaw* dari bangunan apung. Berdasarkan DNV OS E301 (2004), metode analisis simulasi domain pada bangunan lepas pantai dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Frequency Domain Analysis

Frequency domain analysis adalah simulasi kejadian pada saat tertentu dengan interval frekuensi yang telah ditentukan sebelumnya. Metode ini bisa digunakan untuk memperkirakan respon gelombang acak, seperti gerakan dan percepatan *platform*, gaya tendon, dan sudut. Keuntungan metode ini adalah tidak membutuhkan banyak waktu untuk perhitungan, *input* dan *output* juga lebih sering digunakan oleh perancang. Kekurangannya adalah untuk setiap persamaan *non-linear* harus diubah menjadi *linear*. Pada *frequency domain analysis*, keseimbangan dinamik dari sistem *linear* dapat diformulasikan dengan persamaan dibawah ini.

$$M(\omega) \ddot{r} + C(\omega) \dot{r} + K(\omega) r = X e^{i\omega t} \dots \dots \dots (2.1)$$

dengan:

$M(\omega)$ = matrik massa fungsi frekuensi (ton)

$C(\omega)$ = matrik damping fungsi frekuensi (ton/s)

$K(\omega)$ = matrik kekakuan fungsi frekuensi (kN/m)

X = vektor beban kompleks memberikan informasi pada amplitudo beban dan fase pada semua derajat kebebasan. Pola $e^{i\omega t}$ menetapkan variasi harmonik dari contoh beban dengan frekuensi ω .

r = vektor *displacement* (m)

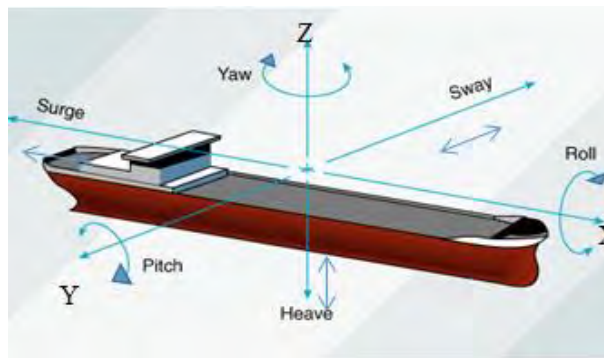
2. Time domain analysis

Time domain analysis adalah penyelesaian gerakan dinamis berdasarkan fungsi waktu. Pendekatan yang dilakukan dalam metode ini akan menggunakan prosedur integrasi waktu dan menghasilkan *time history response* berdasarkan fungsi waktu $x(t)$. Metode analisis *time domain* umumnya seperti program komputer dapat digunakan untuk menganalisis semua situasi tali tambat dibawah pengaruh dinamika frekuensi gelombang. Namun, metode ini dalam membutuhkan proses lebih kompleks dan waktu yang lama. Hal ini membutuhkan simulasi *time history*. *Time history*

memberikan hasil *tension* maksimum, beban jangkar, dan lain-lain. Keuntungan metode ini dibandingkan *frequency domain* adalah semua tipe *non-linear* (matrik sistem dan beban-beban eksternal) dapat dimodelkan dengan lebih tepat. Menurut DNV OS E301, minimal simulasi *time domain* adalah selama 3 jam (10800 s).

2.2.6. Teori Gerak Kapal

Pada dasarnya benda yang mengapung mempunyai enam mode gerakan bebas yang terbagi menjadi dua kelompok, yaitu tiga mode gerakan osilasi translasional dan tiga mode gerakan osilasi rotasional. Berikut adalah keenam mode gerakan tersebut tampak pada Gambar 2.7

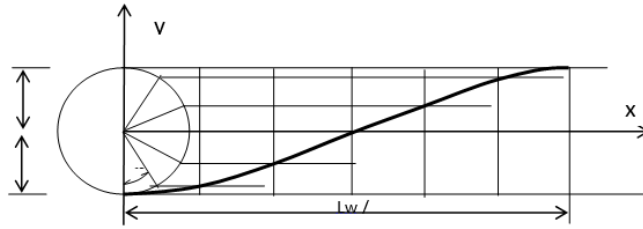


Gambar 2.7 Moda gerak struktur apung (Sumber : Khurana, 1998)

1. Mode gerak osilasi translasional :
 - Surge*, gerakan osilasi transversal arah sumbu x.
 - Sway*, gerakan osilasi transversal arah sumbu y.
 - Heave*, gerakan osilasi transversal arah sumbu z.
2. Mode gerak osilasi rotasional :
 - Roll*, gerakan osilasi rotasional arah sumbu x.
 - Pitch*, gerakan osilasi rotasional arah sumbu y.
 - Yaw*, gerakan osilasi rotasional arah sumbu z.

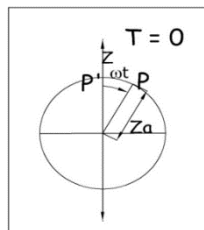
2.2.7. Gelombang Sinusoidal

Gelombang yang terjadi pada FSO Arco Ardjuna adalah gelombang acak, maka perlu dilakukan perhitungan untuk mengetahui gerakan harmonis. Pada gelombang tersebut dapat diproyeksikan menjadi sebuah lingkaran yang tiap titik pada garis berpotongan terhadap titik pada diameter lingkaran. Lebih jelasnya dapat dilihat dari ilustrasi pada Gambar 2.8



Gambar 2.8 Gelombang sinusoidal (Sumber: Bhattacharyya, 1978)

Berdasarkan Gambar di atas, proyeksi dari gelombang adalah sebuah lingkaran yang memiliki sudut yaitu ω dan pada tiap gelombang pada fungsi t dengan asumsi titik p sebagai vektor dari lingkaran. Sehingga lingkaran ini dapat disederhanakan menjadi vektor dari *simple harmonic motion* seperti pada Gambar 2.9 di bawah ini.



Gambar 2.9 Vektor dari *simple harmonic motion* (Sumber: Bhattacharyya, 1978)

Penjelasan Gambar diatas memperlihatkan harga dari titik pusat O terhadap P':

$$(\overline{OP'}) = z = z_a \cos \omega t \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\text{Kecepatan dari } P = v = \dot{z} = \frac{dz}{dt} = -z_a \omega^2 \sin \omega t \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\text{Percepatan dari } P = a = \ddot{z} = \frac{d^2z}{dt^2} = -z_a \omega^2 \cos \omega t \dots\dots\dots (2.4)$$

Periode dari gerakan adalah waktu yang dibutuhkan dari P' untuk mencapai dari titik z dan bergerak ke z lagi dalam satu kejadian, dapat di rumuskan sebagai:

$$T = \frac{2\pi z_a}{\omega z_a} = \frac{2\pi}{\omega} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\text{dengan frekuensi karakteristiknya } f = \frac{1}{T} \dots\dots\dots (2.6)$$

$$\text{sehingga frekuensi sudutnya adalah } \omega = \frac{2\pi}{T} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dalam buku *Dynamic of Marine Vehicles* dijelaskan bahwa kecepatan, panjang gelombang, dan periode gelombang di perhitungkan :

$$V_w = \frac{gL_w}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L_w} \dots\dots\dots (2.8)$$

dengan :

$$V_w = \text{kecepatan gelombang (m/s)}$$

$$g = \text{gravitasi (m/s}^2\text{)}$$

L_w = panjang gelombang (m)

h = kedalaman (m)

karena nilai dari perbandingan $\frac{h}{L_w} \gg 0$

$$\tanh \frac{2\pi h}{L_w} \rightarrow \frac{2\pi h}{L_w} = kh \dots\dots\dots (2.9)$$

disubstitusikan :

$$V_w = \sqrt{gh}$$

$$T_w = \sqrt{\frac{2\pi L_w}{g}}$$

dan

$$\omega_w = \frac{2\pi}{T_w} \dots\dots\dots (2.10)$$

dengan:

T_w = Periode gelombang (s)

ω_w = Frekuensi gelombang (rad/sec)

2.2.8. Pengaruh Arah Gelombang terhadap Kapal

Selain faktor gelombang, terdapat juga faktor gelombang papasan, dimana gelombang tersebut berpapasan terhadap kapal. Dalam ilustrasinya di perlihatkan pada Gambar 2.10

$$T_\theta = \frac{L_w}{V_w - V \cos \mu} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$V_w = \omega_\theta \left(1 - \frac{V}{V_w} \cos \mu\right) \dots\dots\dots (2.12)$$

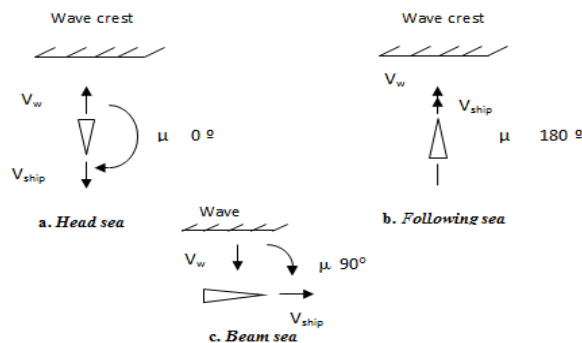
dengan:

T_θ = Periode *Encountering* (s)

V_w = Kecepatan Gelombang (m/s)

V = Kecepatan Kapal (*knot*)

μ = Sudut Datang Gelombang



Gambar 2.10 Pengaruh arah gelombang terhadap kapal (Bhattacharyya 1978)

Head sea terjadi ketika arah datang gelombang menuju struktur apung. Sedangkan *following sea* merupakan arah datang gelombang yang searah dengan pergerakan kapal dan *beam sea* terjadi ketika arah datang gelombang tegak lurus dengan arah pergerakan kapal.

2.2.9. Konsep Pembebanan

Pada suatu proses perancangan bangunan lepas pantai, untuk menentukan kemampuan kerja suatu struktur akan dipengaruhi oleh beban yang terjadi pada bangunan tersebut. Sehingga perancang harus menentukan akurasi atau ketepatan beban yang akan diterapkan dalam perancangan. Menurut (Soedjono, 1999), beban-baban yang harus dipertimbangkan dalam perancangan bangunan lepas pantai adalah sebagai berikut :

1. Beban mati (*Dead Load*)

Beban mati (*dead load*) adalah beban dari komponen-komponan kering serta beban-beban peralatan, perlengkapan dan permesinan yang tidak berubah dari mode operasi pada suatu struktur, meliputi : berat struktur, berat peralatan dari permesinan yang tidak digunakan untuk pengeboran atau proses pengeboran.

2. Beban hidup (*Live Load*)

Beban hidup adalah beban yang terjadi pada *platform* atau bangunan lepas pantai selama dipakai/berfungsi dan bisa berubah dari mode operasi satu ke mode operasi yang lain.

3. Beban akibat kecelakaan (*Accidental Load*).

Beban kecelakaan merupakan beban yang tidak dapat diduga sebelumnya yang terjadi pada suatu bangunan lepas pantai, misalnya tabrakan dengan kapal pemandu operasi, putusnya tali tambat, kebakaran, letusan.

4. Beban lingkungan (*Environmetal Load*)

Beban lingkungan adalah beban yang terjadi karena dipengaruhi oleh lingkungan dimana suatu bangunan lepas pantai dioperasikan atau bekerja. Beban lingkungan yang biasanya digunakan dalam perancangan adalah :

1. Beban angin
2. Beban arus
3. Beban gelombang

Menurut ABS (2004), beban desain pada SPM dibagi menjadi dua. Yaitu pada kondisi operasi dan pada kondisi badai:

a. Kondisi Operasi

Pada kondisi ini, pembebanan yang dipakai adalah pembebanan maksimum yang memungkinkan diterima vessel ketika tertambat. Beban tersebut tidak boleh melampaui beban ijin yang ditentukan. Data yang digunakan harus berasal dari lokasi dimana struktur beroperasi.

b. Kondisi Badai

Kondisi badai untuk SPM didefinisikan sebagai kondisi lingkungan dengan maksimum angin, arus, dan gelombang berdasarkan data 100 tahunan. Pada kondisi ini tidak ada vessel yang boleh ditambatkan ke SPM, kecuali SPM memang dirancang khusus untuk kondisi ini.

Beban yang harus diperhitungkan dalam pendesainan sistem tambat berfungsi untuk menentukan beban kritis yang akan terjadi pada satu kondisi lingkungan. Formula perhitungan yang digunakan mengacu pada Wischer (1988) dalam penelitian Yilmaz (1996).

2.2.9.1. Beban Angin

Beban angin yang digunakan dalam desain diukur pada ketinggian 10m (33ft) di atas permukaan laut. Dalam penelitiannya, Yilmaz (1996) membuktikan bahwa beban angin memberi dampak yang kecil terhadap gerakan dari *buoy*. Persamaan yang digunakan dalam perhitungan ini adalah:

$$F_{1w} = 0,5 \rho_w A_T C_{1w} (\psi_{WR}) V_{WR}^2 \dots\dots\dots(2.13)$$

$$F_{2w} = 0,5 \rho_w A_L C_{2w} (\psi_{WR}) V_{WR}^2 \dots\dots\dots(2.14)$$

$$F_{6w} = 0,5 \rho_w A_L L C_{6w} (\psi_{WR}) V_{WR}^2 \dots\dots\dots(2.15)$$

dengan:

$$V_{WR} = V_{10} \left(\frac{y}{10} \right)^x \dots\dots\dots(2.16)$$

dimana,

- ρ_w = massa jenis air (kg/m^3)
- A_T = total tranverse area (m^2)

A_L	= total lateral area (m^2)
C_{IW}	= koefisien tahanan dalam arah longitudinal
C_{2W}	= koefisien tahanan dalam arah transversal
C_{6W}	= koefisien tahanan dalam arah <i>yaw</i>
V_{WR}	= kecepatan angin (m/s)
ψ_{WR}	= sudut relatif angin (deg)
V_{10}	= kecepatan angin pada ketinggian 10 m (m/s)
y	= ketinggian dimana kecepatan angin dihitung (m)
x	= faktor eksponen ($\approx 0,16$) , (m)

2.2.9.2. Beban Arus

Arus pada kondisi operasi adalah arus air maksimum yang berhubungan dengan angin dan gelombang pada lokasi dimana struktur ditambat. Kecepatan arus di dasar laut maupun di permukaan laut disertakan dalam proses perhitungan. Apabila profil arus tersebut tidak *linear*, maka kecepatan pada kedalaman yang berbeda-beda harus diperhitungkan. Gaya hidrodinamika pada *mooring line* diasumsikan kecil dan gaya tersebut tidak diperhitungkan dalam persamaan gerak (Yilmaz, 1996).

$$F_{1C-Stat} = 0.5 \rho LTC_{1C} (\psi_{CR}) V_{CR}^2 \dots\dots\dots(2.17)$$

$$F_{2C-Stat} = 0.5 \rho LTC_{2C} (\psi_{CR}) V_{CR}^2 \dots\dots\dots(2.18)$$

$$F_{6C-Stat} = 0.5 \rho LTC_{6C} (\psi_{CR}) V_{CR}^2 \dots\dots\dots(2.19)$$

dengan:

ρ = massa jenis air laut (kg/m^3)

L = panjang vessel (m)

T = tinggi sarat vessel (m)

C_{1C} = koefisien tahanan arah longitudinal

C_{2C} = koefisien tahanan arah transversal

C_{6C} = koefisien tahanan arah *yaw*

➤ kecepatan relatif pada *vessel* berhubungan dengan arus

$$V_{CR} = \sqrt{(u_R^2 + v_R^2)} \dots\dots\dots(2.20)$$

➤ sudut relatif pada arus

$$\psi_{CR} = \arctan (-v_R / u_R) \dots\dots\dots(2.21)$$

Nilai koefisien-koefisien tahanan C_{1C} , C_{2C} dan C_{6C} di atas dapat dicari dalam *Oil Companies International Forum* (OCIMF).

2.2.9.3. Beban Gelombang

Bangunan apung mengalami enam mode gerakan bebas yang terbagi menjadi dua jenis, yaitu tiga mode gerakan *translational* dan tiga mode gerakan *rotasional* (Bhattacharyya, 1978). Gaya gelombang *time series* dapat dibangkitkan dari spektrum gelombang sebagai *first order* dan *second order*. Berikut adalah persamaan gaya gelombang *first order*:

$$F_{WV}^{(1)}(t) = \sum_{i=1}^N F_{WV}^{(1)}(\omega_i) \cos[\omega_i t + \varepsilon_i] a_i \dots\dots\dots (2.22)$$

dengan:

$F_{WV}^{(1)}(t)$ = gaya gelombang *first order* tergantung waktu (N)

$F_{WV}^{(1)}$ = gaya *exciting* gelombang *first order* per unit amplitudo gelombang (N)

ε_i = sudut fase komponen gelombang *first order* (deg)

a_i = amplitudo komponen gelombang *first order* (m)

$S(\omega)$ = fungsi spektra gelombang

Second order wave force adalah gelombang dengan periode tinggi yang daerah pembangkitannya tidak didaerah itu (jauh dari lokasi gelombang terjadi) dan berpengaruh dominan pada kekuatan sistem tambat. Berikut adalah persamaan gaya gelombang *second order*:

$$F_{WV}^{(2)}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_i a_j D_{ij} \cos[(\omega_i - \omega_j)t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)] \dots\dots\dots (2.23)$$

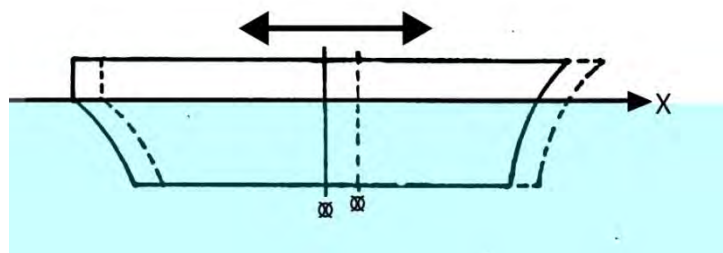
dengan:

D_{ij} = *drift force* per unit amplitudo gelombang (N/m)

2.2.10. Gerakan Osilasi Surge Murni

Surge merupakan gerak osilasi translasi kapal dengan sumbu X sebagai pusat gerak. Gerakan *Surge* dapat dilihat pada Gambar 2.11 .

Persamaan umum pada kapal kondisi *surging* adalah:



Gambar 2.11 Ilustrasi gerakan *surging*

$$a\ddot{x} + b\dot{x} + cx = F_0 \cos \omega_e t \dots\dots\dots (2.24)$$

dengan:

- $a\ddot{x}$: *Inertial force (N)*
- $b\dot{x}$: *Damping force (N)*
- cx : *Restoring force (N)*
- $F_0 \cos \omega_e t$: *Exciting force (N)*

Terdapat empat elemen penting dalam gerakan *surge*, antara lain:

1. *Inertial force ($a\ddot{x}$)*

Merupakan percepatan gerakan secara kontinu dari fluida yang terjadi, gaya yang lebih besar dari massa percepatan waktu kapal (Bhattacharyya, 1978).

$$a \frac{d^2 x}{dt^2} = \text{massa kapal} + \text{massa tambah}$$

$$a \frac{d^2 x}{dt^2} = M \frac{d^2 x}{dt^2} + a_x \frac{d^2 x}{dt^2} \dots\dots\dots (2.25)$$

dengan:

- M : Massa dari kapal
- a_x : Massa tambah

2. *Damping force ($b\dot{x}$)*

Damping force selalu bergerak berlawanan arah dari gerakan kapal dan menyebabkan redaman yang berangsur-angsur pada amplitude gerakan.

$$F_b = -b \frac{dx}{dt} = b \cdot \dot{x} \dots\dots\dots (2.26)$$

Dimana b adalah koefisien untuk gaya damping kondisi surging. Normalnya koefisien damping ini bergantung pada faktor:

- a. Tipe dari gerakan osilasi
- b. Frekuensi *encountering*
- c. Bentuk kapal

3. *Restoring force (cx)*

Restoring force untuk *surging* diberikan sebagai tambahan gaya *bouyancy* kapal ketika di bawah permukaan air. Sehingga *restoring force* diberikan sebagai jumlah *displacement* air atau berat spesifik tambahan pada volume tercelup.

$$cz = \rho \cdot g \cdot A_{wp} \cdot x$$

$$cz = \rho \cdot g \cdot L \cdot B \cdot C_{wp} \cdot x \dots\dots\dots (2.27)$$

dengan:

- A_{wp} : *Water plane area (m²)*

- x : Simpangan gerak *surging* (m)
 C_{wp} : Koefisien *water plane area*
 ρ : massa jenis air laut (1025 kg/ m³)
 g : kecepatan gravitasi (9.81 m/s²)

4. *Exciting force (F)*

Gaya eksitasi pada *surging* adalah pengintegrasian dari penambahan *buoyancy* karena gelombang melewati sepanjang kapal sehingga dapat dirumuskan:

$$F = F_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots (2.28)$$

dengan:

- F_o : Amplitudo gaya eksitasi (m)
 ω_e : Frekuensi *gelombang encountering* (Rad/sec)

2.2.11. Gerakan *Sway Murni*

Sway merupakan gerak osilasi translasi kapal dengan sumbu Y sebagai pusat gerak.

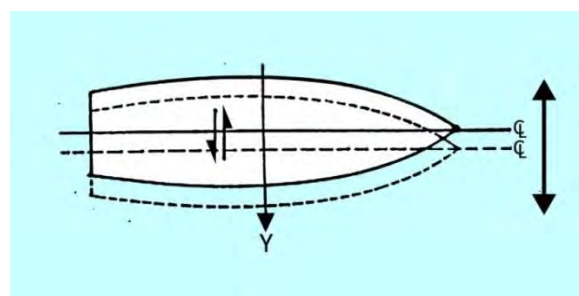
Persamaan umum kapal pada kondisi *swaying* adalah:

$$a\ddot{y} + b\dot{y} + cy = F_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots (2.29)$$

dengan:

- $a\ddot{y}$: *Inertial force (N)*
 $b\dot{y}$: *Damping force (N)*
 cy : *Restoring force (N)*
 $F_o \cos \omega_e t$: *Exciting force (N)*

Gambar 2.12 di bawah ini menjelaskan ilustrasi gerakan sway yang terjadi pada bangunan apung.



Gambar 2.12 Ilustrasi gerakan *swaying*

Terdapat empat elemen penting dalam gerakan *sway*, antara lain:

1. *Inertial force ($a\ddot{y}$)*

$$a \frac{d^2 y}{dt^2} = \text{massa kapal} + \text{massa tambah}$$

$$a \frac{d^2 y}{dt^2} = M \frac{d^2 y}{dt^2} + a_y \frac{d^2 y}{dt^2} \dots \dots \dots (2.30)$$

dengan:

M : Massa dari kapal

a_y : Massa tambah

2. Damping force ($b\dot{y}$)

$$F_b = -b \frac{dy}{dt} = b \cdot \dot{y} \dots \dots \dots (2.31)$$

Dimana b adalah koefisien untuk gaya damping kondisi *swaying*. Normalnya koefisien *damping* ini bergantung pada faktor:

- a. Tipe dari gerakan osilasi
- b. Frekuensi *encountering*
- c. Bentuk kapal

3. Restoring force ($c y$)

$$c z = \rho \cdot g \cdot A_{wp} \cdot y$$

$$c z = \rho \cdot g \cdot L \cdot B \cdot C_{wp} \cdot y \dots \dots \dots (2.32)$$

dengan:

A_{wp} : Water plane area (m^2)

y : Simpangan gerak *swaying* (m)

C_{wp} : Koefisien water plane area

ρ : massa jenis air laut (1025 kg/m^3)

g : kecepatan gravitasi (9.81 m/s^2)

4. Exciting force (F)

Gaya eksitasi pada *swaying* adalah pengintegrasian dari penambahan *buoyancy* karena gelombang melewati sepanjang kapal sehingga dapat dirumuskan:

$$F = F_o \cos \omega_e t \dots \dots \dots (2.33)$$

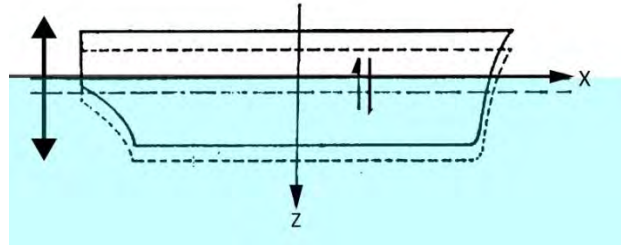
dengan:

F_o : Amplitudo gaya eksitasi (m)

ω_e : Frekuensi gelombang *encountering* (Rad/sec)

2.2.12. Gerakan *Heave* Murni

Heaving adalah gerakan osilasi translasional suatu struktur terapung pada arah sumbu vertikal (sumbu z). Ilustrasi gerakan *heave* dapat dilihat pada Gambar 2.13 dibawah ini



Gambar 2.13 Ilustrasi gerakan *heave*

Dengan keterangan gambar sebagai berikut:

- Δ : *Displacement* kapal
- G : Titik tangkap gaya berat (Titik Berat)
- B : Titik tangkap gaya tekan keatas (Titik *Bouyancy*)
- γV : Gaya tekan keatas
- $W_0 L_0$: *Water line* keadaan awal
- $W_1 L_1$: *Water line* keadaan *heave*
- $a_z \ddot{z}$: Tambahan gaya tekan keatas karena *added mass*
- δ_z : Besar jarak simpangan *heave*

Maka dapat dituliskan persamaan umum pada kapal kondisi heaving adalah :

$$a\ddot{z} + b\dot{z} + cz = F_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots(2.34)$$

dengan:

- $a\ddot{z}$: *Inertial force* (N)
- $b\dot{z}$: *Damping force* (N)
- cz : *Restoring force* (N)
- $F_o \cos \omega_e t$: *Exciting force* (N)

2.2.13. Gerakan *Roll* Murni

Rolling merupakan gerak osilasi rotasional dengan sumbu X sebagai pusat geraknya. Gerakan ini akan berpengaruh terhadap initial velocity sehingga perlu dilakukan perhitungan terhadap momen gaya.

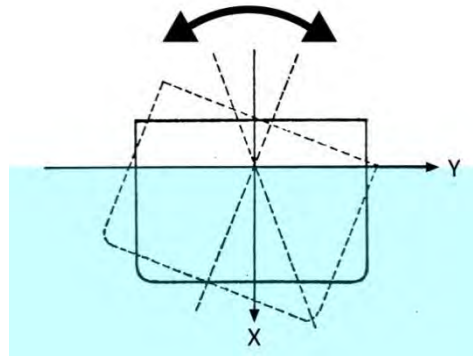
Rumus umum dari persamaan gerak akibat *rolling* ialah:

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M_o \cos \omega_e t \dots\dots\dots(2.35)$$

Dengan:

M_o	= Amplitudo momen eksitasi (m)
ω_e	= Frekuensi gelombang <i>encountering</i> (hz)
$a\ddot{\phi}$	= <i>Inertial moment</i> ($kg.m^2$)
$b\dot{\phi}$	= <i>Damping Moment</i> ($kg.m^2$)
$c\phi$	= <i>Restoring Moment</i> ($kg.m^2$)
$M_o \cos \omega_e t$	= <i>Exciting moment</i> ($kg.m^2$)

Ilustrasi gerakan *roll* dapat dilihat seperti Gambar 2.14 dibawah ini :



Gambar 2.14 Ilustrasi kondisi *rolling* kapal

Karena merupakan gerak rotasional pada gerakan akibat *rolling* terdapat empat jenis momen yang bekerja, yaitu:

1. *Inertial moment* ($a, \ddot{\phi}$)

a merupakan *moment inertia virtual mass* dari $\frac{d^2\phi}{dt^2}$, dengan $\frac{d^2\phi}{dt^2}$ adalah percepatan angular dari *rolling*, *moment inertia virtual mass* pada kondisi *rolling* adalah *moment inertia* kapal ditambah *moment inertia* massa tambah dari *rolling* (Bhattacharyya, 1978).

$$a = I_{xx} + \delta I_{xx}$$

$$a = \frac{\Delta}{g} k_{xx}^2 + \delta I_{xx} \dots \dots \dots (2.36)$$

dengan:

δI_{xx}	: <i>Moment Inertia</i> massa tambah untuk gerakan <i>rolling</i>
k_{xx}^2	: Kuadrat dari jari-jari girasi pada kondisi <i>rolling</i>
I_{xx}	: <i>Moment inertia</i> massa kapal

Menurut Bhattacharyya diasumsikan bahwa distribusi massa secara *longitudinal* adalah sama dengan distribusi *displacement* secara *longitudinal*. Sehingga distribusi *vertical* tidak begitu berpengaruh dan bahwa CG dari

kapal diasumsikan di *midship section*. Secara pendekatan jari-jari girasinya *rolling* adalah:

$$k^2_{xx} = 0,33xB$$

2. Damping moment ($b, \dot{\phi}$)

Damping coefficient adalah koefisien redaman dan $b \frac{d\phi}{dt}$ merupakan momen redaman. *Damping coefficient* untuk *rolling* dapat dihitung dengan pendekatan *strip theory* yang ditentukan oleh tiap station dan di integrasikan sebanyak station di kapal.

3. Restoring moment (c, ϕ)

Restoring moment untuk *rolling* dapat dihitung dengan persamaan sederhana sebagai berikut

$$c\phi = \rho \cdot g \cdot \phi \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} y^2 x(y) dy$$

$$c\phi = \rho \cdot g \cdot \phi \cdot I_x \dots \dots \dots (2.37)$$

Jari-jari metacenter melintang $\overline{M.B_T} = \frac{I_T}{\nabla}$, sehingga

$$c\theta = \rho \cdot g \cdot \overline{MB_T} \cdot \nabla \cdot \phi = \rho \cdot g \cdot \overline{MG_T} \cdot \nabla \cdot \phi$$

$$c\theta = \Delta \cdot \overline{MG_T} \cdot \phi \dots \dots \dots (2.26)$$

dengan:

c : *Restoring moment coefficient*

I_x : Moment inersia dari beban *water plane area*

ρ : massa jenis air laut (1025 kg/ m³)

g : kecepatan gravitasi (9.81 m/s²)

∇ : Volume displacement (m³)

Δ : Displacement (Ton) = $\rho \cdot g \cdot \nabla$

$\overline{MB_T}$: Jari-jari metacenter melintang

$\overline{MG_T}$: Tinggi metacenter melintang

4. Exciting moment

Exciting moment untuk *rolling* dapat dengan mudah di naikan, ini berarti distribusi tekanan hidrostatik dirumuskan:

$$M_\theta = M_o \cos \omega_e t \dots \dots \dots (2.38)$$

2.2.14. Gerakan *Pitch* Murni

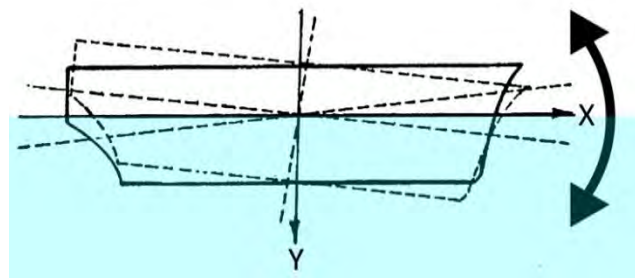
Pitching merupakan osilasi gerak rotasional dengan sumbu Y sebagai pusat gerak. Karena gerak *pitching* akan berpengaruh terhadap kesetimbangan posisi, maka momen yang terjadi akibat *pitching* perlu diperhitungkan. Rumus umum dari persamaan gerakan akibat *pitching* adalah:

$$a\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + c\theta = M_o \cos \omega_e t \dots \dots \dots (2.39)$$

dengan:

- M_o = amplitudo momen eksitasi (m)
- ω_e = frekuensi gelombang *encountering* (hz)
- $a\ddot{\theta}$ = *Inertial Moment* ($kg.m^2$)
- $b\dot{\theta}$ = *Damping Moment* ($kg.m^2$)
- $c\theta$ = *Restoring Moment* ($kg.m^2$)
- $M_o \cos \omega_e t$ = *Exciting Moment* ($kg.m^2$)

Tampak ilustrasi gerakan *pitch* pada Gambar 2.15 dibawah ini



Gambar 2.15 Ilustrasi kondisi *pitch*

Karena merupakan gerak rotasional pada gerakan akibat *pitching* terdapat empat jenis momen yang bekerja, yaitu:

1. *Inertial moment* ($a, \ddot{\theta}$)

$$a = I_{yy} + \delta I_{yy}$$

$$a = \frac{\Delta}{g} k_{yy}^2 + \delta I_{yy} \dots \dots \dots (2.40)$$

dengan:

- δI_{yy} : *Moment Inertia* massa tambah untuk gerakan *pitching*
- k_{yy}^2 : Kuadrat dari jari-jari girasi pada kondisi *pitching*
- I_{yy} : *Moment inertia* massa kapal

Menurut Bhattacharyya, distribusi massa secara *longitudinal* adalah sama dengan distribusi *displacement* secara *longitudinal*. Sehingga distribusi *vertical*

tidak begitu berpengaruh dan bahwa CG dari kapal diasumsikan di *midship section*. Secara pendekatan jari-jari girasinya *pitching* adalah:

$$k^2_{yy} = 0,24L \text{ to } 0,26L$$

2. *Damping moment (b, $\dot{\theta}$)*

Damping coefficient untuk *pitching* dapat dihitung dengan pendekatan *strip theory* yang ditentukan oleh tiap station dan di integrasikan sebanyak station sepanjang kapal.

3. *Restoring moment (c, θ)*

Restoring moment untuk *pitching* dapat dihitung dengan persamaan sederhana sebagai berikut

$$c\theta = \rho \cdot g \cdot \theta \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} x^2 y(x) dx$$

$$c\theta = \rho \cdot g \cdot \theta \cdot I_y \dots \dots \dots (2.41)$$

Jari-jari metacenter memanjang $\overline{M.B_L} = \frac{I_y}{\nabla}$, sehingga

$$c\theta = \rho \cdot g \cdot \overline{M.B_L} \cdot \nabla \cdot \theta = \rho \cdot g \cdot \overline{M.G_L} \cdot \nabla \cdot \theta \text{ (sudut kecil)}$$

$$c\theta = \Delta \cdot \overline{M.G_L} \cdot \theta \dots \dots \dots (2.42)$$

dengan:

c : *Restoring moment coefficient*

I_y : Moment inersia dari beban *water plane area*

ρ : massa jenis air laut (1025 kg/ m³)

g : kecepatan gravitasi (9.81 m/s²)

∇ : Volume displacement (m³)

Δ : Displacement (Ton) = $\rho \cdot g \cdot \nabla$

$\overline{M.B_L}$: Jari-jari metacenter memanjang

$\overline{M.G_L}$: Tinggi metacenter memanjang

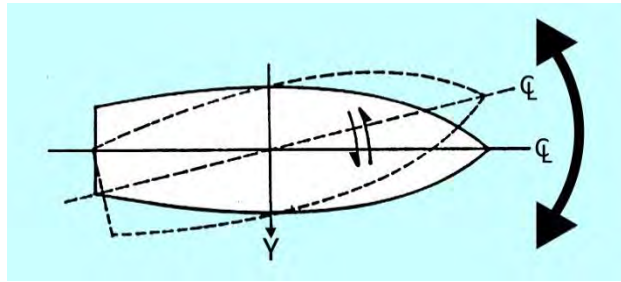
4. *Exciting moment*

Exciting moment untuk *pitching* dikarenakan tidak seimbang momen akibat dari gelombang tranverse axis dari kapal. *Pitching moment* dapat dengan mudah di naikan, ini berarti distribusi tekanan hidrostatik dirumuskan:

$$M_\theta = M_o \cos \omega_e t \dots \dots \dots (2.43)$$

2.2.15. Gerakan *Yaw Murni*

Gerak *yaw* merupakan gerak osilasi rotasional kapal dengan sumbu Z sebagai pusat gerak seperti tampak pada ilustrasi Gambar 2.16



Gambar 2.16 Ilustrasi gerakan yawing

Persamaan umum gerak kapal untuk yawing ialah:

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M_o \cos \omega_e t \dots \dots \dots (2.44)$$

dengan:

- M_o = amplitudo momen eksitasi (m)
- ω_e = frekuensi gelombang *encountering* (hz)
- $a\ddot{\phi}$ = *Inertial Moment* ($kg.m^2$)
- $b\dot{\phi}$ = *Damping Moment* ($kg.m^2$)
- $c\phi$ = *Restoring Moment* ($kg.m^2$)
- $M_o \cos \omega_e t$ = *Exciting Moment* ($kg.m^2$)

Berikut penjelasannya :

1. *Inertial moment* ($a, \ddot{\phi}$)

a merupakan *moment inertia virtual mass* dari $\frac{d^2\ddot{\phi}}{dt^2}$, dengan $\frac{d^2\ddot{\phi}}{dt^2}$ adalah percepatan angular dari yawing, *moment inertia virtual mass* pada kondisi yawing adalah *moment inertia* kapal ditambah *moment inertia* massa tambah dari yawing (Bhattacharyya, 1978).

$$a = I_{zz} + \delta I_{zz}$$

$$a = \frac{\Delta}{g} k_{zz}^2 + \delta I_{zz} \dots \dots \dots (2.45)$$

dengan:

- δI_{zz} : *Moment Inertia* massa tambah untuk gerakan yawing
- k_{zz}^2 : Kuadrat dari jari-jari girasi pada kondisi yawing
- I_{zz} : *Moment inertia* massa kapal

Menurut Bhattacharyya diasumsikan bahwa distribusi massa secara *longitudinal* adalah sama dengan distribusi *displacement* secara *longitudinal*. Sehingga distribusi *vertical* tidak begitu berpengaruh dan bahwa CG dari kapal diasumsikan di *midship section*. Secara pendekatan jari-jari girasinya yawing adalah:

$$k_{zz}^2 = 0,24L \text{ to } 0,26L$$

2. Damping moment ($b, \dot{\phi}$)

Damping coefficient adalah koefisien redaman dan $b \frac{d\phi}{dt}$ merupakan momen redaman. *Damping coefficient* untuk yawing dapat dihitung dengan pendekatan *strip theory* yang ditentukan oleh tiap station dan di integrasikan sebanyak station di kapal.

3. Restoring moment (c, ϕ)

Restoring moment untuk yawing dapat dihitung dengan persamaan sederhana sebagai berikut

$$c\phi = \rho \cdot g \cdot \phi \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} y^2 x(y) dy$$

$$c\phi = \rho \cdot g \cdot \phi \cdot I_x \dots \dots \dots (2.46)$$

Jari-jari metacenter melintang $\overline{M.B_T} = \frac{I_T}{\nabla}$, sehingga

$$c\theta = \rho \cdot g \cdot \overline{M.B_T} \cdot \nabla \cdot \phi = \rho \cdot g \cdot \overline{M.G_T} \cdot \nabla \cdot \phi$$

$$c\theta = \Delta \cdot \overline{M.G_T} \cdot \phi \dots \dots \dots (2.47)$$

dengan:

- c : Restoring moment coefficient
- I_x : Moment inersia dari beban *water plane area*
- ρ : massa jenis air laut (1025 kg/ m³)
- g : kecepatan gravitasi (9.81 m/s²)
- ∇ : Volume displacement (m³)
- Δ : Displacement (Ton) = $\rho \cdot g \cdot \nabla$
- $\overline{M.B_T}$: Jari-jari metacenter melintang
- $\overline{M.G_T}$: Tinggi metacenter melintang

4. Exciting moment

$$M_\theta = M_o \cos \omega_e t \dots \dots \dots (2.48)$$

2.2.16. Gerakan Couple Six Degree of Freedom

Karena bangunan apung yang ditinjau terdiri dari enam mode gerakan bebas (*six degree of freedom*), dengan asumsi bahwa gerakan-gerakan osilasi tersebut adalah linier dan harmonik, maka persamaan diferensial gerakan kopel dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\sum_{n=1}^6 [(\mathbf{M}_{jk} + \mathbf{A}_{jk}) \zeta_k + \mathbf{B}_{jk} \dot{\zeta}_k + \mathbf{K}_{jk} \zeta_k] = \mathbf{F}_j e^{i\omega t} \quad ; \quad j, k = 1 \dots \dots (2.49)$$

dengan:

\mathbf{M}_{jk} = matriks massa dan momen inersia massa bangunan laut,
 \mathbf{A}_{jk} = matriks koefisien-koefisien massa tambah hidrodinamik,
 \mathbf{B}_{jk} = matriks koefisien-koefisien redaman hidrodinamik,
 \mathbf{K}_{jk} = matriks koefisien-koefisien kekakuan atau gaya dan momen hidrostatik,
 \mathbf{F}_j = matriks gaya eksitasi (F_1, F_2, F_3) dan momen eksitasi (M_4, M_5, M_6) dalam fungsi kompleks (dinyatakan oleh e^t),
 F_1 = gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan *surge*,
 F_2 = gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan *sway*,
 F_3 = gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan *heave*,
 M_4 = momen eksitasi yang menyebabkan gerakan *roll*,
 M_5 = momen eksitasi yang menyebabkan gerakan *pitch*,
 M_6 = momen eksitasi yang menyebabkan gerakan *yaw*,
 ζ_k = elevasi gerakan pada moda ke k ,
 $\dot{\zeta}_k$ = elevasi kecepatan gerak pada moda ke k ,
 $\ddot{\zeta}_k$ = elevasi percepatan gerak pada moda ke k .
 F_1, F_2 , dan F_3 adalah amplitudo gaya-gaya eksitasi yang mengakibatkan *surge*, *sway*, dan *heave*, sedangkan F_4, F_5 , dan F_6 adalah amplitudo momen eksitasi untuk *roll*, *pitch*, dan *yaw*.

2.2.17. Response Amplitude Operator (RAO)

Response Amplitude Operator (RAO) adalah fungsi respon yang terjadi akibat gelombang dalam rentang frekuensi yang mengenai sebuah struktur lepas pantai. RAO juga disebut sebagai *Transfer Function* karena RAO merupakan alat untuk mentransfer beban luar (gelombang) dalam bentuk respon pada suatu struktur. RAO dapat juga didefinisikan sebagai hubungan antara amplitudo gerakan struktur terhadap amplitudo gelombang.

RAO gerakan translasi (*surge*, *sway*, *heave*) merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan bangunan apung dibanding dengan amplitudo gelombang yang terjadi dan dinyatakan dalam satuan m/m. Persamaan RAO gerakan translasi adalah sebagai berikut

$$\text{RAO}_{(\omega)} = \frac{A(X,Y,Z)_{(\omega)}}{\zeta_{0(\omega)}} \text{ (m/m) } \dots\dots\dots (2.50)$$

Dengan

$A_{(\omega)}$ = Amplitudo gerakan translasi struktur bangunan apung (m)

$\zeta_{0(\omega)}$ = Amplitudo gelombang (m)

RAO gerakan rotasi (*roll, pitch, yaw*) merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi (dalam radian) dengan kemiringan gelombang, yakni yang merupakan perkalian antara angka gelombang dengan amplitudo gelombang insiden (DjTamiko, 2012). Persamaan RAO gerakan rotasional adalah sebagai berikut

$$RAO_{(\omega)} = \frac{\theta \{ \emptyset, \theta, \phi \}_{(\omega)}}{k_{\omega} \zeta_{0(\omega)}} \text{ (rad/rad) (2.51)}$$

Dengan :

$\theta_{(\omega)}$ = Amplitudo gerakan rotasi struktur bangunan apung (rad)

$\zeta_{0(\omega)}$ = Amplitudo gelombang (m)

k_{ω} = angka gelombang ($k_w = \omega^2 / g$)

2.2.18. Spektra Gelombang

Perancangan bangunan laut seharusnya didasarkan pada spektra gelombang yang dihasilkan dari data gelombang setempat. Formulasi spektrum gelombang yang digunakan dalam penelitian ini adalah spektra JONSWAP.

Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) – untuk perairan tertutup/kepulauan, yang merupakan modifikasi dari Spektrum Pierson Moskowitz (Det Norske Veritas, 2007)

dengan,

$$S(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \cdot \gamma^{\exp(-0,5 \left(\frac{\omega - \omega_p}{\sigma - \omega_p}\right)^2)} \text{ (2.52)}$$

ω_p = frekuensi puncak spektra (*spectral peak frequency*)

γ = parameter puncak (*peakedness parameter*)

σ = parameter bentuk (*shape parameter*)

untuk $\omega \leq \omega_p = 0,07$ dan $\omega \geq \omega_p = 0,09$

Sedangkan, nilai dari parameter puncak (γ) dapat ditentukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\gamma = EXP \left[3,4843 \left(1 - 0,1975 \left(0,036 - 0,0056 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \right) \frac{T_p^4}{H_s^2} \right) \right] \dots\dots\dots (2.53)$$

dengan:

T_p = periode puncak spektra

H_s = tinggi gelombang signifikan

2.2.19. Spektra Respon

Gerakan bangunan apung dalam kondisi ideal dapat dihitung sebagai reaksi adanya eksitasi gelombang sinusoidal, dengan karakteristik tinggi atau amplitudo dan frekuensi tertentu. Perhitungan kemudian dilakukan dengan mengambil amplitudo gelombang yang konstan, namun harga frekuensinya divariasikan dengan interval kenaikan tertentu.

Gelombang acak merupakan superposisi dari komponen-komponen pembentuknya yang berupa gelombang sinusoidal dalam jumlah tidak terhingga. Tiap-tiap komponen gelombang mempunyai tingkat energi tertentu yang dikontribusikan, yang kemudian secara keseluruhan diakumulasikan dalam bentuk spektrum energi gelombang (Djarmiko, 2012).

Dalam analisis respon bangunan apung pada gelombang reguler dapat diketahui pengaruh interaksi hidrodinamik pada massa tambah, *potential damping* dan gaya eksternal. Analisis tersebut menghasilkan respon struktur pada gelombang reguler. Respon struktur pada gelombang acak dapat dilakukan dengan mentransformasikan spektrum gelombang menjadi spektrum respon. Spektrum respon didefinisikan sebagai respon kerapatan energi pada struktur akibat gelombang. Hal ini dapat dilakukan dengan mengalikan harga pangkat kuadrat dari *Response Amplitude Operator* (RAO) dengan spektrum gelombang pada daerah struktur bangunan apung tersebut beroperasi., yang secara persamaan matematis dapat ditulis dengan:

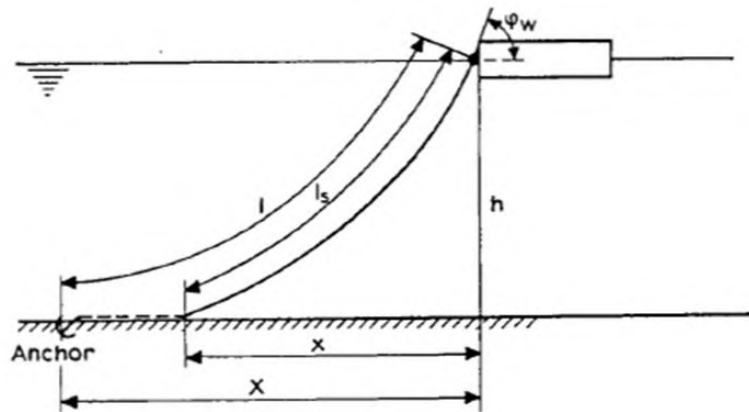
$$S_R(\omega) = [RAO(\omega)]^2 \times S(\omega) \dots\dots\dots (2.54)$$

Dimana :

- $S_R(\omega)$ = spektrum respon ($m^2 - sec$)
- $S(\omega)$ = spektrum gelombang ($m^2 - sec$)
- RAO = *response amplitude operator* (m/m)
- ω = frekuensi gelombang (rad/sec)

2.2.20. Penentuan *Mooring Line*

Penentuan panjang *mooring line* berfungsi supaya FSO pada penambatannya memiliki posisi yang tepat. Dan juga supaya *mooring line* itu sendiri memiliki panjang dan *pretension* yang sesuai. Ilustrasi perhitungan panjang *mooring line* dapat dilihat pada Gambar 2.17 sebagai berikut:



Gambar 2.17 Panjang Minimum *Mooring Line* (Sumber: Faltinsen, 1990)

Berikut adalah penentuan panjang minimum dari *mooring line* (*basic equation*).

$$X = l - h \left(1 + 2 \frac{a}{h} \right)^{\frac{1}{2}} + a \cosh^{-1} \left(1 + \left(\frac{h}{a} \right) \right) \dots \dots \dots (2.55)$$

- L = panjang *anchor leg*
- H = kedalaman
- a = T/w
- T = *minimum breaking load* (MBL)
- w = 182720 N/m

2.2.21. *Offset dan Tension maksimum*

Offset adalah perpindahan posisi pada struktur dengan jarak sejauh *x* meter setelah terkena gelombang dan merupakan salah satu bentuk respon dari struktur pada saat mendapat beban lingkungan. *Offset* dapat dibedakan menjadi beberapa kelompok, yaitu:

a. *Mean offset*.

Displasemen dari *vessel* karena kombinasi dari pengaruh beban arus, *mean wave drift* dan angin.

b. *Maximum offset.*

Mean offset yang mendapat pengaruh dari kombinasi frekuensi gelombang dan *low-frequency motion*.

Maximum offset dapat ditentukan dengan prosedur di bawah ini:

1. $S_{lfmax} > S_{wfmax}$, maka :

$$S_{max} = S_{mean} + S_{lfmax} + S_{wfsig} \dots \dots \dots (2.56)$$

2. $S_{wfmax} > S_{lfmax}$, maka :

$$S_{max} = S_{mean} + S_{wfmax} + S_{lfsig} \dots \dots \dots (2.57)$$

dimana,

S_{mean} = *mean vessel offset*

S_{max} = *maximum vessel offset*

S_{wfmax} = *maximum wave frequency motion*

S_{wfsig} = *significant wave frequency motion*

S_{lfmax} = *maximum low-frequency motion*

S_{lfsig} = *significant low-frequency motion*

Alternatif lain yang dapat digunakan dengan menggunakan time domain, frekuensi domain kombinasi keduanya atau model testing. *Mean offset* yang diijinkan adalah 2% sampai 4% dari kedalaman perairan sedangkan untuk *maximum offset* dipengaruhi oleh banyak faktor seperti kedalaman perairan, lingkungan dan sistem riser. Tetapi pada umumnya pada range 8% sampai 12% dari kedalaman perairan.

Gerakan pada *vessel* dan pengaruh lingkungan menyebabkan adanya tarikan pada *mooring line*. Tarikan (*tension*) yang terjadi pada *mooring line* dapat dibedakan menjadi dua, yaitu:

a. *Mean tension.*

Tension pada *mooring line* yang berkaitan dengan *mean offset* pada *vessel*.

b. *Maximum tension.*

Mean tension yang mendapat pengaruh dari kombinasi frekuensi gelombang dan *low-frequency tension*.

Menurut *API-RP2SK 3rd edition*, *maximum tension* dapat ditentukan dengan prosedur dibawah ini:

1. $T_{lfmax} > T_{wfmax}$, maka:

$$T_{max} = T_{mean} + T_{lfmax} + T_{wfsig} \dots\dots\dots(2.58)$$

2. $T_{wfmax} > T_{lfmax}$, maka:

$$T_{max} = T_{mean} + T_{wfmax} + T_{lfsig} \dots\dots\dots(2.59)$$

dengan:

T_{mean} = mean tension

T_{max} = maximum tension

T_{wfmax} = maximum wave frequency tension

T_{wfsig} = significant wave frequency tension

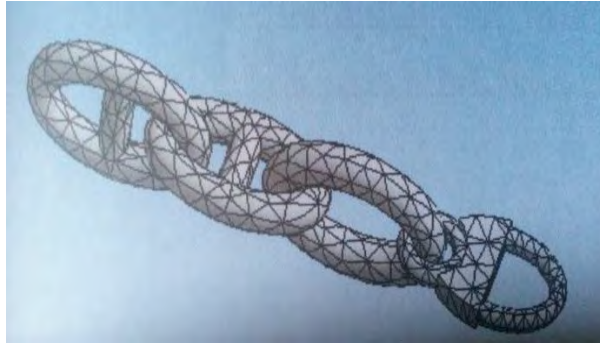
T_{lfmax} = maximum low-frequency tension

T_{lfsig} = significant low-frequency tension

2.2.22. **Boundary Condition and Meshing**

Boundary condition atau kondisi batas sangatlah penting dalam proses analisis suatu struktur. *Boundary condition* sendiri dapat terbagi menjadi 3 bagian utama, yaitu *inertial*, *loads*, dan *supports*. *Boundary condition* tipe *inertial* diantaranya yaitu percepatan, *standard earth gravity*, dan kecepatan rotasi. Kemudian *Boundary condition* tipe *loads* diantaranya yaitu tekanan (*pressure*), gaya, momen, dan lain-lain. Sedangkan *boundary condition* tipe *support* diantaranya adalah *fixed supports*, *displacement*, dan lain-lain. *Boundary condition* sendiri dapat kita aplikasikan sesuai dengan analisis yang akan kita lakukan. Seperti contohnya pada sebuah geometri struktur, *boundary condition* dapat diterapkan pada struktur sebagai *body*, *face*, *edge*, maupun titik sesuai dengan kondisi analisis yang ingin kita lakukan.

Pembuatan *mesh* sangat diperhatikan ukuran *mesh* dan jenis *mesh* yang digunakan, semakin kecil ukuran *mesh* yang digunakan pada model, maka hasil yang didapatkan akan semakin teliti, tetapi membutuhkan daya komputasi dan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan *mesh* yang memiliki ukuran yang lebih besar. Oleh karena itu, besar ukuran *mesh* harus diatur sedemikian rupa sehingga diperoleh hasil yang teliti. Dibawah ini Gambar 2.18 contoh *meshing* pada konfigurasi *Chain*.



Gambar 2.18 Contoh *Meshing* pada konfigurasi *Chain* (Setyawan, 2012)

2.2.23. Tegangan Maksimum Utama

Tegangan dapat ditransformasi dari suatu set sumbu koordinat ke set sumbu koordinat lainnya. Dengan transformasi pula dapat dicari set sumbu koordinat pada suatu titik yang memberikan tegangan utama dari kondisi tegangan yang telah diketahui di titik itu. Yang dimaksud tegangan utama ialah tegangan yang hanya memiliki nilai tidak nol untuk tegangan normal saja, sedangkan nilai tegangan gesernya nol.

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \dots\dots\dots(2.60)$$

2.2.24. Metode Perhitungan Umur Kelelahan

Secara umum, terdapat 2 (dua) metode yang dapat digunakan untuk analisis kelelahan, yaitu pendekatan kurva S-N (*S-N curve approach*) yang dibuat berdasarkan tes kelelahan, dan pendekatan mekanika kepecahan (*fracture mechanics approach*). Untuk tujuan desain kelelahan, pendekatan kurva S-N lebih banyak digunakan dan dianggap sebagai metode yang paling cocok. Sedangkan metode mekanika kepecahan digunakan untuk menentukan ukuran cacat yang dapat diterima, menaksir perambatan retak kelelahan, merencanakan inspeksi dan strategi untuk memperbaikinya, dan lain-lain.

Analisa fatigue dengan metode S-N curve pada sambungan struktur dilakukan berdasarkan hukum kegagalan Palmgren-Miner (*miner's rule*). Menurut white dan ayyub (1996) miners's rule merupakan hipotesis kumulatif kerusakan berdasarkan konsep *strain energy*. Konsep *strain energy* menyatakan bahwa kerusakan terjadi ketika total *strain energy* pada siklus (n) dari variable amplitudo pembebanan adalah sama dengan total dari siklus N dari konstan amplitudo pembebanan.

Metode pendekatan S-N curve mempunyai 4 metodologi dalam mengestimasi kumulatif kegagalan *fatigue* (*cumulative fatigue damage*) yaitu metode *deterministic*, metode *simplified fatigue assessment*, metode *spectral* dan metode *time domain fatigue*. Diantara keempat metode tersebut, metode yang paling banyak digunakan dalam berbagai rules klasifikasi terutama anggota IASC seperti ABS, GL, LR dan bahkan CSR adalah metode *simplified fatigue* dengan pendekatan empiris parameter distribusi weibull (Bai, 2003). Pada penelitian ini metode yang digunakan untuk analisa *fatigue* adalah menggunakan metode S-N Curve dengan *Simplified Fatigue Analysis*. Untuk analisis kelelahan dengan menggunakan metode *simplified fatigue assessment* akan didapatkan hasil yang lebih akurat, karena adanya faktor parameter bentuk dari distribusi *Weibull* dalam *Simplified fatigue assessment*.

2.2.25. Kurva S-N

Dasar dari kurva S-N atau *Wohler curve* adalah plot dari *stress* (S) dan *cycle* (N). Kurva S-N digunakan dalam karakteristik *fatigue* pada material yang mengalami pembebanan yang berulang pada magnitude konstan. Secara umum persamaan dan kurva S-N dapat dilihat sebagai berikut (DNV-Position Mooring) :

$$n_c(s) = a_D s^{-m} \dots\dots\dots (2.61)$$

$$\log(n_c(s)) = \log(a_D) - m \cdot \log(s) \dots\dots\dots (2.62)$$

Dimana :

$n_c(s)$ = jumlah siklus (rentang tegangan)

a_D = parameter potongan kurva S-N

m = kemiringan kurva S-N

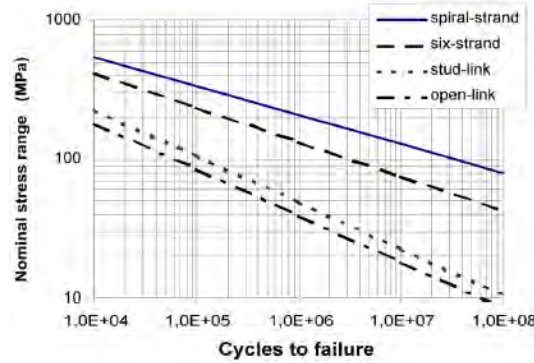
s = rentang tegangan

Tabel 2.1 Parameter Kurva S-N untuk Chain

Table F1 S-N Fatigue Curve Parameters		
	a_D	m
Stud chain	$1.2 \cdot 10^{11}$	3.0
Studless chain (open link)	$6.0 \cdot 10^{10}$	3.0
Six strand wire rope	$3.4 \cdot 10^{14}$	4.0
Spiral strand wire rope	$1.7 \cdot 10^{17}$	4.8

(Sumber : DNV-Position Mooring)

Berikut pada Gambar 2.19 di bawah ini adalah kurva S-N



Gambar 2.19 Kurva S-N untuk chain (Sumber : DNV-Position Mooring)

2.2.26. Penaksiran Umur Kelelahan Sederhana

Penaksiran ini menggunakan metode *simplified* (Biro Klasifikasi Indonesia), yang dinyatakan sebagai berikut :

$$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma \left(1 + \frac{m}{\xi} \right) \quad \dots\dots\dots (2.63)$$

$$\mu_i = \frac{\left\{ \gamma \left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i \right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma \left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i \right) \right\}}{1 - \frac{\gamma \left(1 + \frac{m}{\xi} \right)}{\Gamma \left(1 + \frac{m}{\xi} \right)}} \quad \dots\dots\dots (2.64)$$

$$v_i = \left(\frac{S_q}{S_{Ri}} \right)^{\xi} \ln N_R \quad \dots\dots\dots (2.65)$$

N_L = jumlah siklus untuk rencana umur desain = $\frac{f_0 U}{4 \log L}$

K_2 = konstanta sesuai kurva S-N

S_{Ri} = stress range (Mpa)

S_q = stress range pada perpotongan 2 segmen pada kurva S-N

m = slope

Δm = perubahan slope pada segmen atas-bawah pada kurva S-N

N_R = 10000, jumlah siklus

ξ = parameter distribusi tegangan = $1,4 - 0,2 \cdot \alpha \cdot L^{0.2}$

μ_i = koefisien tegangan

$\Gamma(x)$ = fungsi gamma

U = design-life (detik)

L = panjang struktur (m)

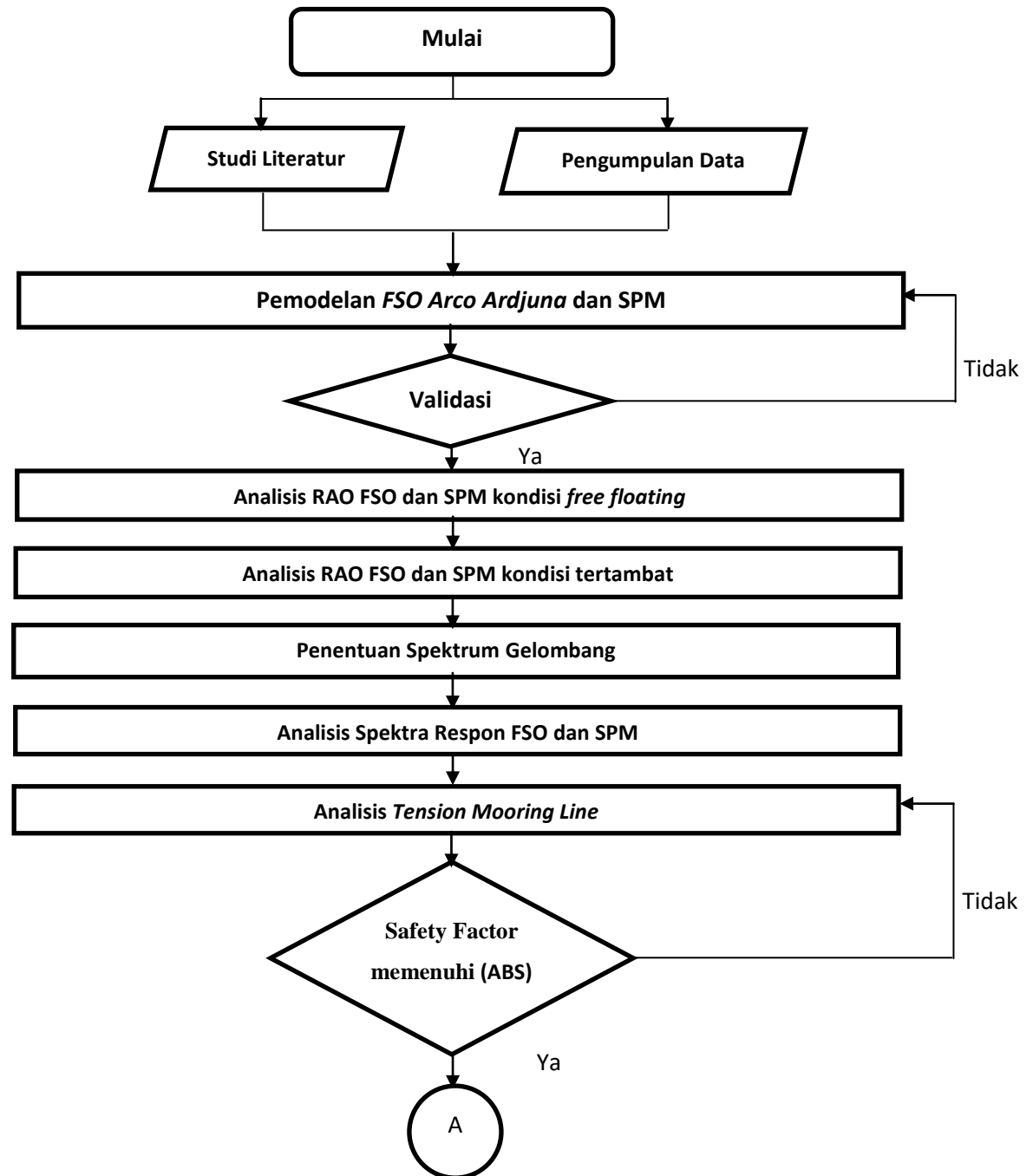
Selanjutnya, rasio *cumulative fatigue damage* (D) dapat diubah ke dalam perhitungan umur kelelahan menggunakan persamaan di bawah ini

$$fatigue\ life = \frac{design\ life}{D} \dots\dots\dots (2.66)$$

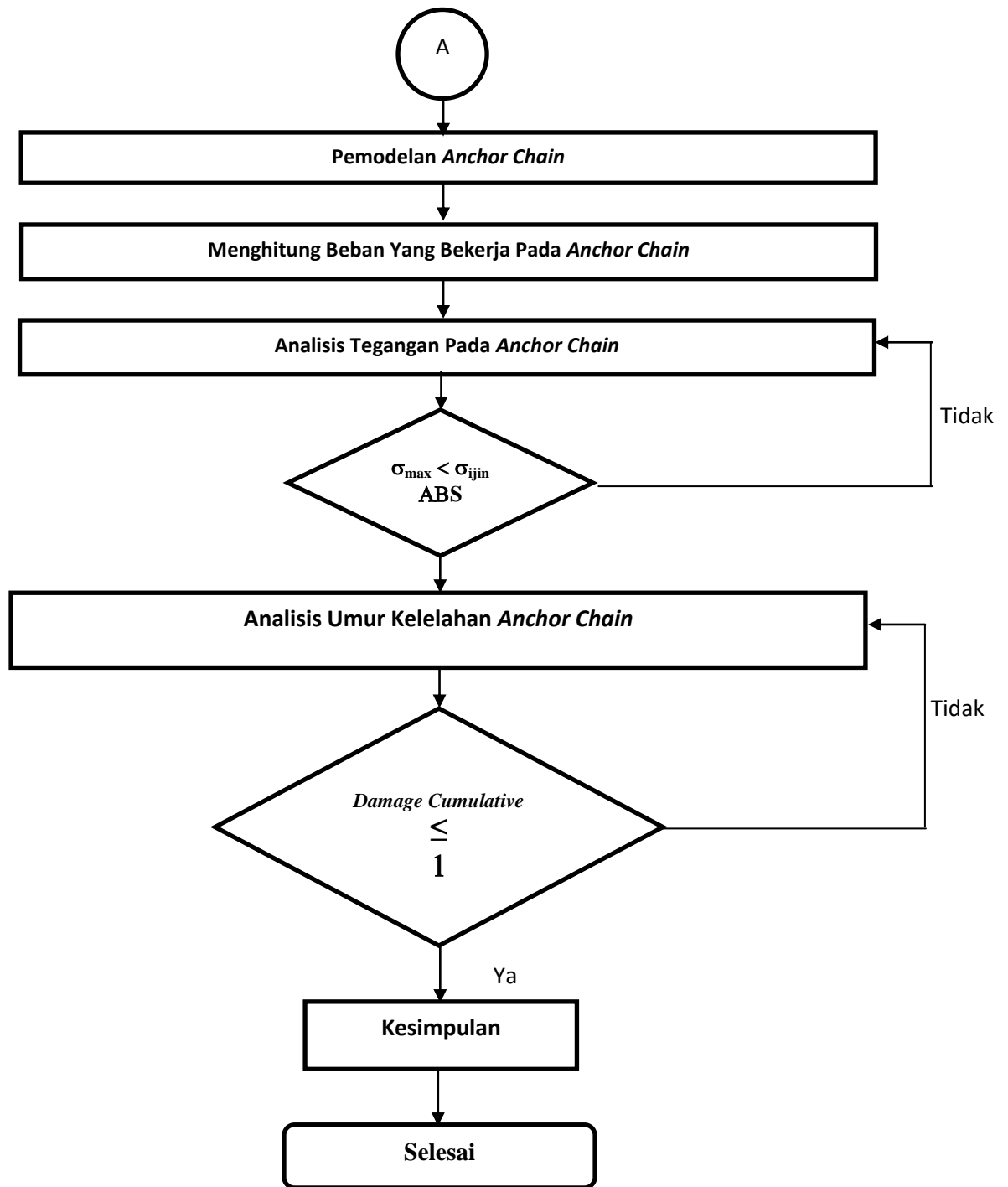
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Dalam penelitian ini, metodologi penelitian yang digunakan secara umum dapat digambarkan dalam bentuk diagram alir (*flowchart*) seperti pada Gambar 3.1 berikut:



Gambar 3.1. Diagram Alir Metodologi Penelitian



Gambar 3.1. Diagram Alir Metodologi Penelitian (**Lanjutan**)

3.2 Prosedur Penelitian

Sesuai Gambar 3.1, Penelitian ini dilakukan dengan mengikuti tahapan – tahapan sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Pada tugas akhir ini mengambil bahan-bahan yang dibutuhkan sebagai studi literatur dari buku, materi perkuliahan, jurnal, dan juga mengacu dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang mempunyai keterkaitan pembahasan sebagai acuan dasar teori yang digunakan, selain itu juga pada penelitian ini mengacu pada *standart* maupun *code* yang relevan.

2. Pengumpulan Data

Pengumpulan Data FSO Arco Ardjuna, SPM, data hidrostatik FSO Arco Ardjuna, *mooring line property* dan data lingkungan. Data FSO Arco Ardjuna, SPM, data hidrostatik FSO Arco Ardjuna, *mooring line property* dan data lingkungan didapatkan dari PT. Pertamina Hulu Energi ONWJ.

3. Pemodelan FSO Arco Ardjuna dan SPM

Memodelkan ukuran dan model FSO Arco Ardjuna dan SPM sesuai data yang diperoleh menggunakan Maxsurf Modeller.

4. Validasi Model FSO Arco Ardjuna dan SPM

Memvalidasi data hidrostatik FSO Arco Ardjuna dan SPM hasil luaran ANSYS Aqwa dengan data hidrostatik yang telah ada untuk mengetahui tingkat kesalahan dalam pemodelan (*error*), dalam kasus ini tingkat error dibatasi untuk tidak melebihi 5% dari data hidrostatik yang telah ada.

5. Analisis Gerak FSO Arco Ardjuna dan SPM dalam Kondisi *Free Floating*

Menganalisis respon gerakan pada struktur FSO Arco Ardjuna maupun struktur SPM (*Single Point Mooring*) untuk mengetahui karakteristik gerakan pada masing-masing struktur dalam kondisi terapung bebas dan juga didapatkan data RAO (*Response Amplitude Operator*) pada masing-masing struktur yang nantinya akan digunakan pada langkah selanjutnya.

6. Analisis Gerak FSO Arco Ardjuna dan SPM dalam Kondisi Tertambat

Memodelkan model FSO Arco Ardjuna dan SPM dalam kondisi tertambat untuk mendapatkan RAO tertambat dengan beban gelombang tahunan menggunakan ANSYS Aqwa.

7. Analisis *tension* pada *hawser* dan *anchor leg*

Dari hasil analisis ini didapatkan *tension* yang terjadi pada *hawser* dan *anchor leg*. Kemudian menghitung *safety factor* yang kemudian divalidasikan dengan ABS untuk mengetahui apakah nilai *safety factor* yang terjadi memenuhi syarat yang sesuai pada ABS. Setiap *tension* pada *hawser* yang diijinkan menurut ABS yaitu pada *anchor legs* harus lebih dari 1,67 sedangkan pada *hawser* harus lebih dari 1.82. *Safety factor* didapat dari membagi MBL (*Minimum Breaking Load*) dengan *tension* maksimum yang didapat.

8. Permodelan *Anchor Chain*

Memodelkan *Anchor Chain* menggunakan AutoCAD 2014 sesuai dengan data *Calm Buoy Anchoring System* yang didapat dari perusahaan.

9. Menghitung Beban Yang Bekerja Pada *Anchor Chain*

Kalkulasi beban pada *Anchor Chain* akibat gerak FSO dalam kondisi tertambat pada SPM, untuk mendefinisikan kombinasi pembebanan (*load case*) yang akan digunakan dalam analisis tegangan.

10. Analisis Tegangan Pada *Anchor Chain*

Menganalisis Tegangan yang terjadi pada *Anchor Chain* sesuai banyak *load case* berbasis data inputan beban menggunakan ANSYS, yang sebelumnya telah terlebih dahulu dilakukan analisis *meshing sensitivity* untuk mendapatkan inputan ukuran *meshing* struktur yang cukup sensitif dalam mendefinisikan hasil luaran tegangan terhadap inputan beban yang dihitung. Setelah itu, dilakukan analisis tegangan terhadap masing – masing *load case* yang telah dihitung terlebih dahulu beban apa saja yang berpengaruh dan ditentukan kombinasi pembebanan dari beban – beban tersebut.

11. Analisis Umur Kelelahan *Anchor Chain*

Menganalisis Umur Kelelahan berdasarkan *Hot-Spot Stress Range* yang terlebih dahulu telah dihitung berdasarkan *Hot-Spot Stress* dari hasil analisis tegangan. Langkah selanjutnya yaitu menganalisis umur kelelahan daripada konstruksi *Anchor Chain* dengan menggunakan kurva S-N berdasarkan hukum kegagalan Palmgren Miner dengan mengestimasi kumulatif kegagalan *fatigue* menggunakan metode *simplified fatigue assessment*

3.3 Pengumpulan Data

a. FSO Arco Ardjuna

Data Ukuran Utama Arco Ardjuna adalah sebagai berikut :

Tabel 3.1 *Principle dimension* FSO Arco Ardjuna

<i>Designation</i>	<i>Units</i>	<i>Data</i>	
<i>Length, Loa</i>	m	142.6	
<i>Breadth, B</i>	m	48.2	
<i>Depth, D</i>	m	26.5	
<i>Displacement</i>	tonne	15.529	153.202
<i>Draft to Baseline</i>	m	2.5	24
WSA	m ²	6.681	12.813
<i>Max. Cross sect. area</i>	m ²	114.34	1,150.63
<i>Waterplane area</i>	m ²	6239	6.239

(Sumber: PT. PHE ONWJ)

b. Single Point Mooring:

Tabel 3.2 Principal Dimension CALM buoy SPM 3

<i>Designation</i>	<i>Unit</i>	<i>Data</i>
<i>Shell Outer Diameter</i>	m	12
<i>Centre Well Diameter</i>	m	3.57
<i>Skirt Outer Diameter</i>	m	16.26
<i>Buoy Body Height</i>	m	5.3
<i>Skirt Height/ Baseline</i>	m	1
<i>Buoy Installed Draft</i>	m	2.38
<i>Centre of Gravity (KG)</i>	m	3.42
<i>Mass</i>	kg	255340

(Sumber: Pertamina PHE ONWJ)

c. Mooring Hawser

Tabel 3.3 Spesifikasi Teknis *Mooring Hawser*

<i>Designation</i>	<i>Data</i>
<i>Number of Lines</i>	<i>Twin Line</i>
<i>Material</i>	Nylon
<i>Length</i>	220 ft
<i>Design Mooring Force</i>	400 tonnes
<i>New Dry Breaking Strength per Hawser</i>	4094 kN

(Sumber : PT. PHE ONWJ)

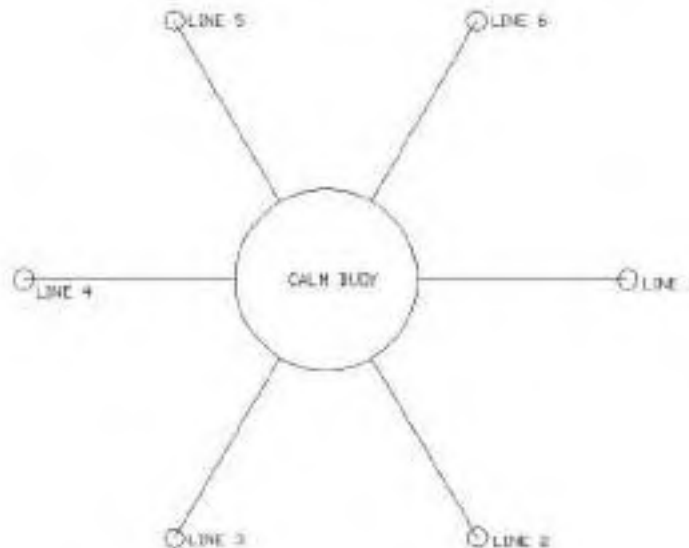
d. *Anchor Legs*

Berikut merupakan spesifikasi teknis *Anchor Leg* yang akan dianalisis.

Tabel 3.4 Spesifikasi teknis *anchor legs* SPM 3

<i>Number of Legs</i>	6
<i>Anchoring Pattern</i>	<i>Even Spacing (60°)</i>
<i>Paid out length</i>	350 m
<i>Pretension</i>	262.17 kN
<i>Pretension angle (w/horizontal)</i>	45.26°
<i>Number of segment</i>	1
<i>Chain diameter</i>	102 mm
<i>Chain type</i>	R3
<i>Minimum breaking load</i>	8315 kN
<i>Minimum breaking load after corrosion</i>	7051 kN
<i>Unit weight in Air</i>	210.16 kg/m
<i>Unit weight in Water</i>	182.72 kg/m
<i>Stiffness EA</i>	868 MN
<i>Anchoring radius</i>	302.57 m

(Sumber: Pertamina PHE ONWJ)



Gambar 3.2 *Anchor Legs dan Pattern Definition (Top View)* (Sumber: PT. PHE ONWJ)

e. Data Lingkungan

Tabel 3.5 Data Lingkungan Perairan Laut Jawa

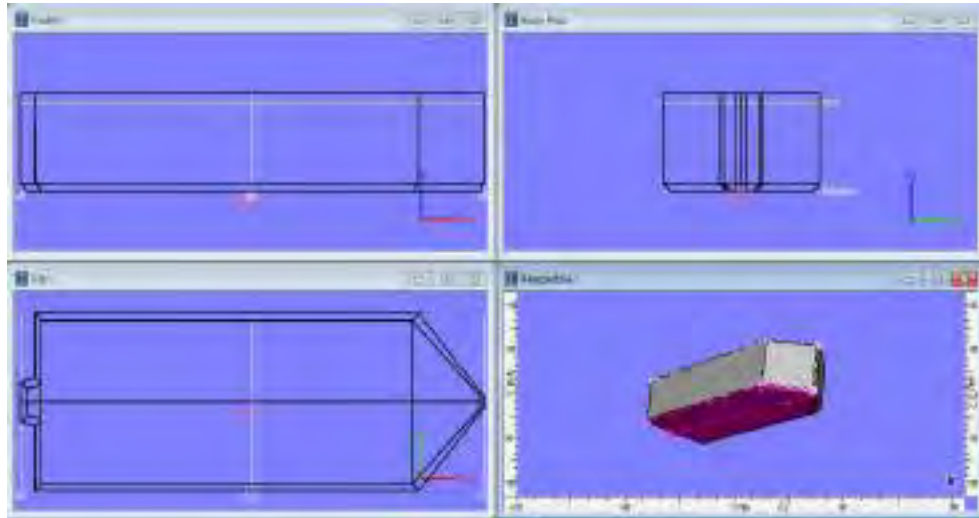
<i>Parameter</i>	<i>Unit</i>	<i>1-year return period</i>
Kedalaman	m	45
Tinggi Gelombang Maksimum/Hm	m	3.2
Periode Gelombang Maksimum /Tm	s	6.6
Tinggi Gelombang Signifikan/Hs	m	1.8
Periode Gelombang Signifikan/Ts	s	6.3
Periode Puncak Gelombang (Tp)	s	6.3
Kecepatan Angin	m/s	12.3
Spektrum gelombang		JONSWAP
Kecepatan Arus 0% kedalaman	m/s	0.72
Kecepatan Arus 10% kedalaman	m/s	0.62
Kecepatan Arus 20% kedalaman	m/s	0.54
Kecepatan Arus 30% kedalaman	m/s	0.48
Kecepatan Arus 40% kedalaman	m/s	0.44
Kecepatan Arus 50% kedalaman	m/s	0.41
Kecepatan Arus 60% kedalaman	m/s	0.39
Kecepatan Arus 70% kedalaman	m/s	0.37
Kecepatan Arus 80% kedalaman	m/s	0.36
Kecepatan Arus 90% kedalaman	m/s	0.35
Kecepatan Arus 100% kedalaman	m/s	0.34

Untuk konfigurasi struktur dalam pengerjaan tugas akhir ini, arah pembebanan untuk 0° berarti beban tersebut datang dari arah depan SPM berlawanan dengan gerak maju FSO. Sedangkan untuk 180° berarti beban tersebut datang dari arah belakang FSO searah dengan gerak maju FSO. Kemudian untuk 90° berarti beban tersebut datang dari arah samping SPM dan FSO melintang dengan gerak maju FSO. Pada penelitian ini arah pembebanan yang digunakan adalah mulai dari 0°, 90° dan 180°. Hal ini dikarenakan generalisasi beban yang datang ke badan FSO dan SPM dianggap cukup dan mewakili beban yang datang dari arah sebaliknya, serta mempertimbangkan jumlah kejadian gelombang paling besar berdasarkan data pada Tabel 3.6 terdapat pada arah datang gelombang tersebut.

Tabel 3.6 Data Kejadian Gelombang Laut Jawa

Tinggi Gelombang (ft)	Periode Gelombang (s)	Kejadian selama 10 tahun								Total
		0	45	90	135	180	225	270	315	
0.0 - 3.9	4.6	19983677	13296001	18996312	6714600	18996811	7651209	1546512	1225300	88410422
4.0 - 7.9	6.4	576740	660750	608050	229880	428050	332600	54490	63640	2954200
8.0 - 11.9	6.8	19339	9270	11390	7752	10390	1212	910	1060	61323
12.0 - 15.9	7.2	492	298	458	260	411	215			2134
16.0 - 19.9	7.5	15	8	13	2	11	2			51
20.0 - 23.9	7.8	1	1	1		1				4
TOTAL										91428134

Berikut merupakan hasil permodelan FSO Arco Ardjuna pada Maxsurf Modeller pada Gambar 4.2



Gambar 4.2 Pemodelan FSO Arco Ardjuna Menggunakan Maxsurf V8i 20 Advanced Modeller

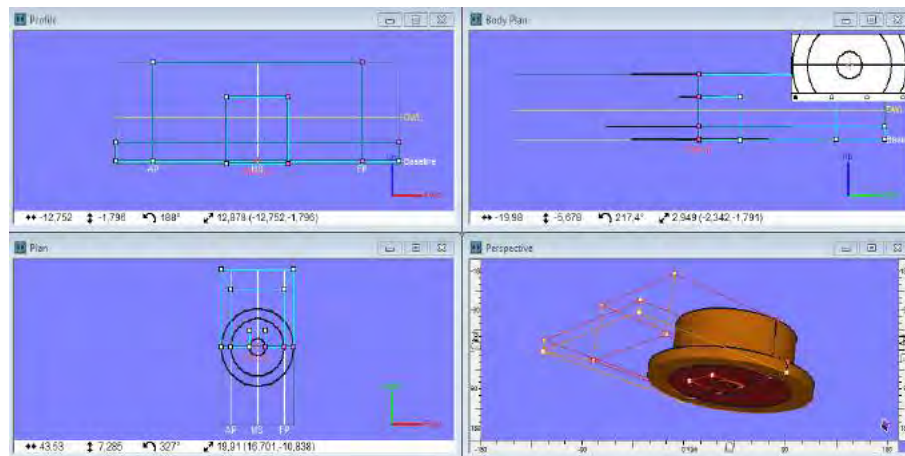
4.1.2 Pemodelan *Single Point Mooring 3*

SPM 3 merupakan struktur yang digunakan untuk menambat FSO Arco Ardjuna. Permodelan SPM 3 dilakukan dibantu dengan penggunaan *software* Maxsurf V8i 20 – Advanced Modeller dan AutoCAD 3D. Sebelum proses pembuatan model perlu diketahui parameter input penting, yakni data *principal dimension*. *Principal Dimension* SPM 3 yang dimiliki oleh PT. PHE ONWJ terlampir di Tabel 4.2 dibawah ini.

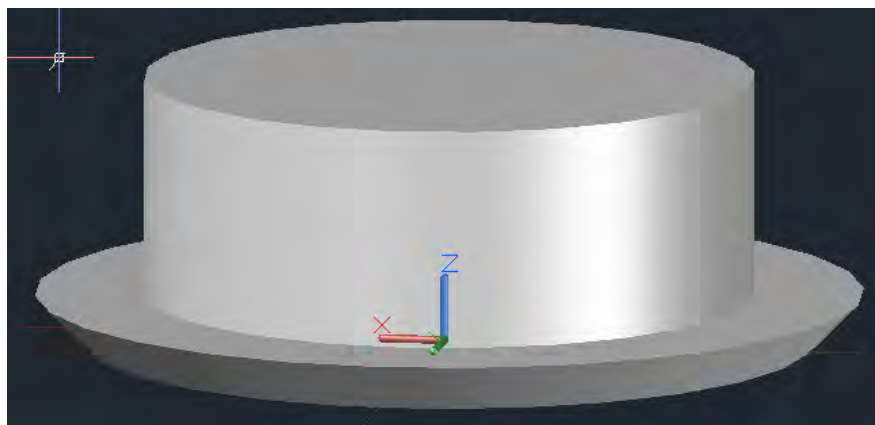
Tabel 4.2 Principal Dimension SPM 3

<i>Designation</i>	<i>Unit</i>	<i>Data</i>
<i>Shell Outer Diameter</i>	m	12
<i>Centre Well Diameter</i>	m	3.57
<i>Skirt Outer Diameter</i>	m	16.26
<i>Buoy Body Height</i>	m	5.3
<i>Skirt Height/ Baseline</i>	m	1
<i>Buoy Installed Draft</i>	m	2.38
<i>Centre of Gravity (KG)</i>	m	3.42
<i>Mass</i>	kg	255340

Hasil Permodelan SPM 3 menggunakan software Maxsurf Modeller tampak seperti Gambar 4.3 dibawah ini



Gambar 4.3 Pemodelan SPM 3 menggunakan Maxsurf V8i 20 Advanced Modeller



Gambar 4.4 Pemodelan SPM 3 menggunakan AutoCAD 3D

4.2. Hidrostatik

Untuk mendapatkan hasil pemodelan FSO yang akurat sesuai dengan keadaan sebenarnya, maka rancangan model harus divalidasi. Validasi model dilakukan dengan membandingkan data hasil perhitungan hidrostatik keluaran Maxsurf Modeller dengan data hidrostatik FSO Arco Ardjuna yang sudah ada pada kondisi *full load* dan *light load*.

Besaran hidrostatik yang dibandingkan meliputi Displacement, koefisien-koefisien bentuk, letak *Centre of buoyancy*, *Wetted Surface Area* (WSA) dan lain-lain. Dibawah ini akan ditampilkan data hidrostatik hasil luaran software Maxsurf V8i 20 – *Advanced Modeller* pemodelan FSO Arco Ardjuna untuk kondisi *light load* dan *full load*. Data Hidrostatik hasil

luaran *Maxsurf Modeller* tampak pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 serta validasi data keluaran Hidrostatik pada Tabel 4.5 dan Tabel 4.6

Tabel 4.3 Data hidrostatik hasil luaran *software* Maxsurf untuk model FSO Arco Ardjuna dalam

Measurement	Value	Units
1 Displacement	1533.08	t
2 Volume (displaced)	14959.012	m ³
3 Draft Amidships	24.000	m
4 Immersed depth	24.000	m
5 WL Length	142.600	m
6 Beam max extents o	48.200	m
7 Wetted Area	14357.894	m ²
8 Max sect. area	1152.800	m ²
9 Waterpl. Area	6201.473	m ²
10 Prismatic coeff. (Cp)	0.910	
11 Block coeff. (Cb)	0.907	
12 Max Sect. area coeff	0.997	
13 Waterpl. area coeff	0.911	
14 LCB length	-2.885	from z
15 LCF length	-2.907	from z
16 LCB %	-2.023	from z
17 LCF %	-2.039	from z
18 KB	12.053	m
19 KG fluid	13.040	m
20 BMT	7.714	m
21 BML	59.726	m
22 GMT corrected	6.728	m
23 GML	58.742	m
24 KMT	19.768	m
25 KML	71.782	m
26 Immersion (TPC)	64.180	tonne/c
27 MTC	831.527	tonne
28 RM at 1 deg = GMLD	18009.594	tonne

Density (water) 1.025 tonne/m³

Std densities 1.025 tonne/m³ - Std. Metric sea water (1025.0 kg/m³)

VCG 13.04 m

Recalculate

Select Rows

Close

Tabel 4.4 Data hidrostatik hasil luaran *software* Maxsurf untuk model FSO Arco Ardjuna dalam

Measurement	Value	Units
1 Displacement	15321	t
2 Volume (displaced)	14947.352	m ³
3 Draft Amidships	2.500	m
4 Immersed depth	2.500	m
5 WL Length	142.600	m
6 Beam max extents o	48.200	m
7 Wetted Area	8726.264	m ²
8 Max sect. area	116.500	m ²
9 Waterpl. Area	6261.473	m ²
10 Prismatic coeff. (Cp)	0.900	
11 Block coeff. (Cb)	0.870	
12 Max Sect. area coeff	0.967	
13 Waterpl. area coeff	0.911	
14 LCB length	-2.681	from z
15 LCF length	-2.907	from z
16 LCB %	-1.880	from z
17 LCF %	-2.039	from z
18 KB	1.277	m
19 KG fluid	14.048	m
20 BMT	77.151	m
21 BML	587.863	m
22 GMT corrected	64.428	m
23 GML	584.909	m
24 KMT	78.668	m
25 KML	598.940	m
26 Immersion (TPC)	64.180	tonne/c
27 MTC	938.420	tonne
28 RM at 1 deg = GMLD	17227.391	tonne

Density (water) 1.025 tonne/m³

Std densities 1.025 tonne/m³ - Std. Metric sea water (1025.0 kg/m³)

VCG 14.04 m

Recalculate

Select Rows

Close

Tabel 4.5 Koreksi Hidrostatik Antara data hasil luaran Maxsurf dengan data yang sudah ada dalam kondisi *light*

Designation	UNIT	LIGHT		
		Data	Model	Error
Displacement	tonne	15529	15083	0.029
Draft to Baseline	m	2.5	2.5	0.000
WSA	m ²	6681	6690.549	-0.001
Max. Cross sect. area	m ²	114.34	114.658	-0.003
Waterplane area	m ²	6239	6198.083	0.007
Cp		0.91	0.903	0.008
Cb		0.873	0.862	0.013
Cm		0.959	0.958	0.001
Cwp		0.908	0.908	0.000
LCB from midship	m	-2.69	-2.617	0.027
LCF from midship	m	-2.79	-2.88	-0.032
KB	m	1.26	1.301	-0.033
KMt	m	78	78.243	-0.003
KML	m	590.8	596.378	-0.009

Tabel 4.6 Koreksi Hidrostatik Antara data hasil luaran Maxsurf dengan data yang sudah ada dalam kondisi *full*

<i>Designation</i>	<i>UNIT</i>	<i>FULL</i>		
		<i>Data</i>	<i>Model</i>	<i>Error</i>
<i>Displacement</i>	tonne	153202	153223	-0.0001
<i>Draft to Baseline</i>	m	24	24	0.0000
<i>WSA</i>	m ²	12813	14357.894	-0.1206
<i>Max. Cross sect. area</i>	m ²	1150.63	1152.8	-0.0019
<i>Waterplane area</i>	m ²	6239	6258.133	-0.0031
<i>C_p</i>		0.908	0.909	-0.0011
<i>C_b</i>		0.904	0.906	-0.0022
<i>C_m</i>		0.996	0.997	-0.0010
<i>C_{wp}</i>		0.908	0.91	-0.0022
<i>LCB from midship</i>	m	-2.78	4.857	2.7471
<i>LCF from midship</i>	m	-2.79	4.833	2.7323
<i>KB</i>	m	12.02	12.054	-0.0028
<i>K_{Mt}</i>	m	19.73	19.766	-0.0018
<i>K_{ML}</i>	m	71.3	71.719	-0.0059

Tabel 4.7 Koreksi Hidrostatik *Single Point Mooring 3*

<i>Designation</i>	<i>Unit</i>	<i>Data</i>	<i>Model</i>	<i>Error</i>
<i>Number of Compartments</i>	m	6		
<i>Shell Outer Diameter</i>	m	12	12	
<i>Centre Well Diameter</i>	m	3.57	3.57	
<i>Skirt Outer Diameter</i>	m	16.26	16.26	
<i>Buoy Body Height</i>	m	5.3	5.3	
<i>Skirt Thickness</i>	mm	12	12	
<i>Skirt Height/Baseline</i>	m	1	1	
<i>Displacement</i>	t	255.34	252.852	0.97%
<i>Draft</i>	m	2.38	2.38	
<i>Centre of Gravity</i>	m	3.42	3.42	

4.3. Analisis Gerakan Kapal

Analisis gerakan struktur FSO dan SPM dilakukan dengan bantuan software Ansys Aqwa. Data-data yang diperlukan untuk analisis gerakan menggunakan Ansys Aqwa adalah data offset kapal yang digunakan program untuk mengidentifikasi badan kapal, untuk menghitung luas, volume dan *displacement*, sehingga proses tersebut dapat digunakan sebagai salah satu validasi Ansys Aqwa. Permodelan yang dilakukan di dalam Ansys Aqwa dapat

di *import* dengan *software* Maxsurf Modeler dan AutoCAD 3D sehingga kapal dan SPM tidak perlu dimodelkan dari awal untuk geometrinya.

Data input lainnya yang digunakan dalam analisis gerakan menggunakan Ansys Aqwa antara lain data lingkungan seperti tinggi dan periode gelombang, kedalaman perairan, arah sudut datang gelombang (0° , 90° dan 180° untuk *head sea*, *beam sea* dan *following sea*) (Battacharyya) dengan mempertimbangkan jumlah angka kejadian gelombang yang didapatkan dari perusahaan, kondisi kapal menyangkut *draft* kapal (*full load* 24 m dan *light load* 2.5 m), radius girasi, dan VCG. Data lingkungan yang digunakan untuk analisa gerakan FSO dan SPM menggunakan data 1 tahunan yang didapat dari PT. PHE ONWJ dan terlampir pada Tabel 4.8 berikut ini

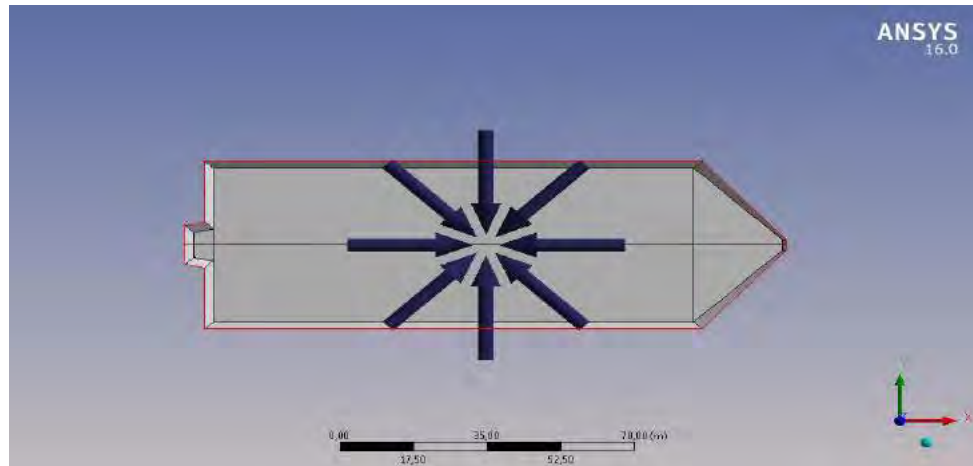
Tabel 4.8 Data lingkungan

Parameter	Unit	1 year return period
Kedalaman	m	45
Tinggi Gelombang Maksimum/Hm	m	3.2
Periode Gelombang Maksimum/Tm	s	6.6
Tinggi Gelombang Signifikan/Hs	m	1.8
Periode Gelombang Signifikan/Ts	s	6.3
Periode Puncak Gelombang (Tp)	s	6.3
Kecepatan Angin	m/s	12.3
Spektrum Gelombang	JONSWAP	
Kecepatan Arus 0% Kedalaman	m/s	0.72
Kecepatan Arus 0% Kedalaman	m/s	0.62
Kecepatan Arus 0% Kedalaman	m/s	0.54
Kecepatan Arus 0% Kedalaman	m/s	0.48
Kecepatan Arus 0% Kedalaman	m/s	0.44
Kecepatan Arus 0% Kedalaman	m/s	0.41
Kecepatan Arus 0% Kedalaman	m/s	0.39
Kecepatan Arus 0% Kedalaman	m/s	0.37
Kecepatan Arus 0% Kedalaman	m/s	0.36
Kecepatan Arus 0% Kedalaman	m/s	0.35
Kecepatan Arus 0% Kedalaman	m/s	0.34

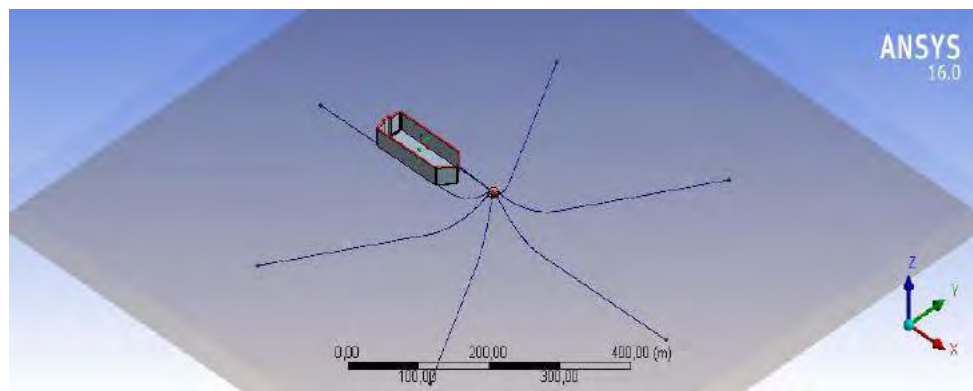
(Sumber: PT. PHE ONWJ)

Dibawah ini merupakan permodelan FSO Arco Ardjuna dan Single Point Mooring 3 menggunakan Software Ansys Aqwa untuk menganalisis karakteristik gerakan struktur pada gelombang

reguler. Konfigurasi permodelan FSO Arco Ardjuna pada Ansys Aqwa terlampir pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6



Gambar 4.5 Pemodelan FSO Arco Ardjuna dalam kondisi *free floating* menggunakan software ANSYS Workbench 16.0 – AQWA



Gambar 4.6 Pemodelan FSO Arco Ardjuna dalam kondisi tertambat menggunakan software ANSYS Workbench 16.0 – AQWA

4.4. *Response Amplitude Operator (RAO)*

Permodelan dengan Ansys Aqwa 16.0 menghasilkan *output* berupa RAO. Adapun hasil RAO *motion* FSO Arco Ardjuna untuk arah 0° , 90° dan 180° . Respon gerakan yang terjadi untuk masing-masing arah pembebanan (*heading*) dibagi menjadi 2 yaitu, RAO gerakan translasional dan RAO gerakan rotasional. Dimana untuk RAO gerakan translasional meliputi gerakan *surge*, *sway*, dan *heave*, dengan satuan (m/m). Sedangkan untuk RAO gerakan rotasional meliputi gerakan *roll*, *pitch*, dan *yaw*, dengan satuan (deg/m).

Pada setiap arah pembebanan tersebut, terdapat gerak dominan yang mempengaruhi *motion* kapal. Berikut adalah gerak dominan yang dipengaruhi oleh masing-masing *heading*:

1. *Following Seas* ($\alpha=180^\circ$) dan *Head Seas* ($\alpha=0^\circ$)

Pada arah 0° dan 180° gerakan dominan yang terjadi adalah gerakan *surge*, *heave*, dan *pitch*. Sedangkan gerakan *sway*, *roll*, dan *yaw* tidak ada atau sangat kecil.

2. *Beam Seas* ($\alpha=90^\circ$)

Pada arah 90° gerakan dominan yang terjadi adalah gerakan *sway*, *heave*, *roll* dan Sedangkan gerakan, *surge*, *pitch*, dan *yaw* tidak ada atau sangat kecil.

4.5. Mooring Analysis

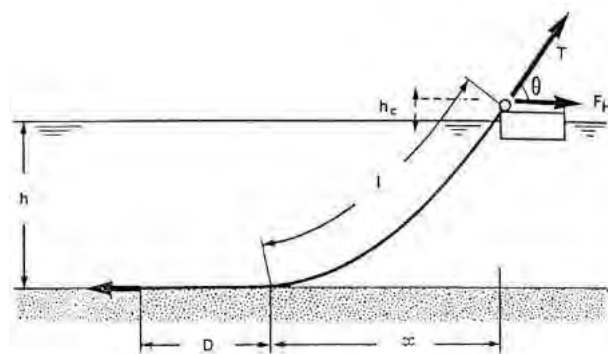
4.5.1. Penentuan Panjang Minimum *Anchor Line* pada SPM

Panjang minimum *anchor line* adalah 304.44 m. Nilai tersebut diperoleh dengan menggunakan persamaan Flantinsen, yaitu persamaan tentang hubungan panjang tali dengan offset x, berikut adalah persamaan yang digunakan :

$$x = l - h \left(1 + 2 \frac{a}{h} \right)^{\frac{1}{2}} + a \operatorname{Cos} h^{-1} \left(1 + \frac{h}{a} \right)$$

dengan :

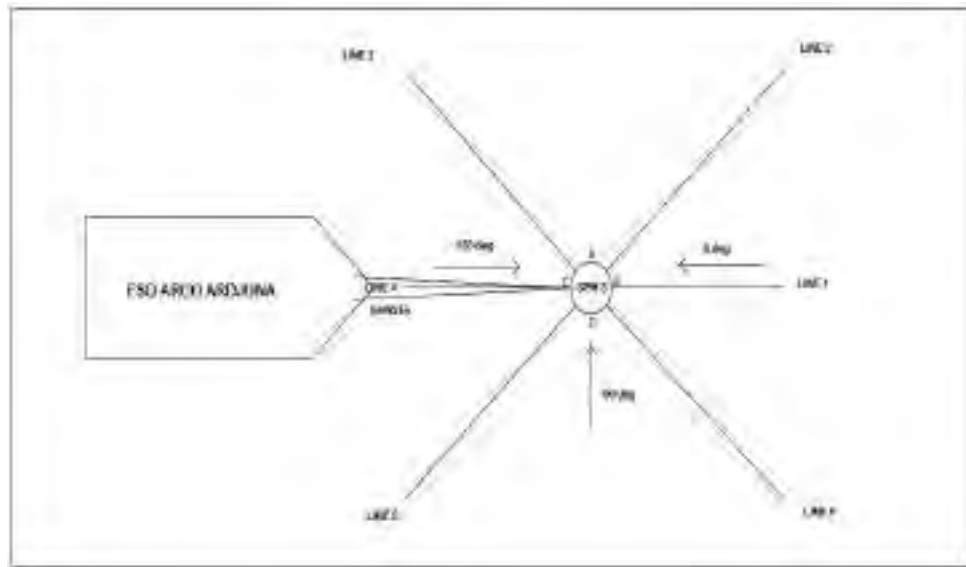
- x = panjang minimum *anchor line*
- l = total panjang *mooring line* (m)
- h = kedalaman air laut + freeboard (m)
- a = T / W
- T = *Minimum breaking load*
- W = berat chain



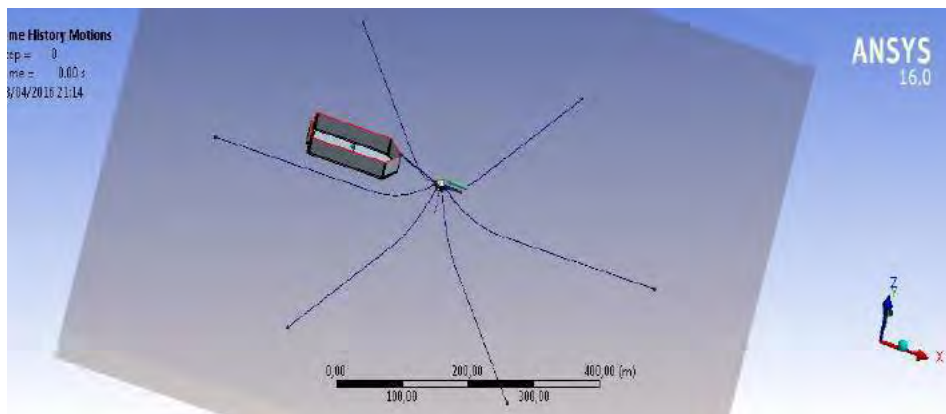
Gambar 4.7 Panjang minimum *mooring line* (Faltinsen, 1990)

4.5.2. Arah Pembebanan Gelombang pada *Mooring Analysis*

Analisis *mooring* dilakukan untuk mendapatkan *output* berupa RAO SPM dan FSO serta analisis tension yang terjadi pada Mooring line dan hawser yang menghubungkan FSO pada kondisi *full load* dan *light load* ke SPM 3 pada masing-masing *heading*. Beban yang digunakan dalam analisis *mooring* ini adalah beban gelombang 1 tahunan, dengan 3 arah pembebanan yaitu 0° , 90° , dan 180° seperti yang terlihat pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 dibawah ini



Gambar 4.8 Arah pembebanan gelombang pada *mooring analysis*



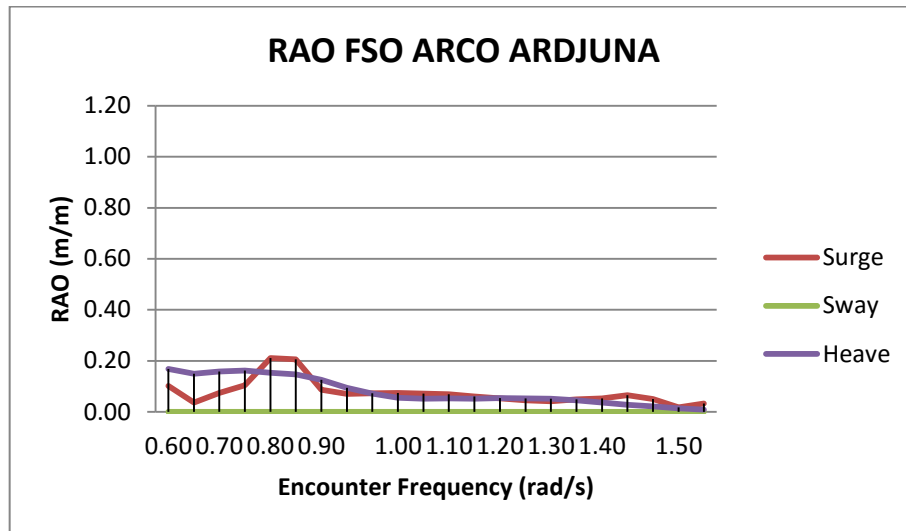
Gambar 4.9 Arah pembebanan gelombang pada *mooring analysis*

4.5.3. RAO FSO Arco Ardjuna saat tertambat

Analisa RAO pada FSO Arco Ardjuna pada saat muatan *light load* saat *termooring* dilakukan untuk mengetahui bagaimana pergerakan FSO AA saat tertambat. Hasil Analisa tersebut ditinjau dari *heading* pembebanan

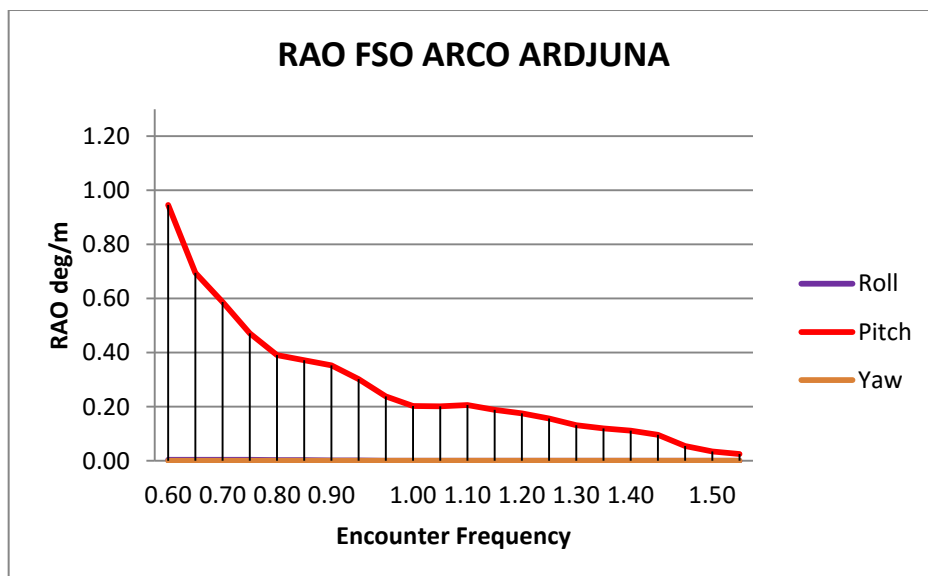
0, 90 dan 180 derajat merupakan gerakan translasional *Surge*, *Sway*, *Heave*, dan gerakan rotasional *Roll*, *Pitch* dan *Yaw*. RAO gerakan FSO Arco Ardjuna tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.10 sampai 4.21 dibawah ini

4.5.3.1. RAO FSO Arco Ardjuna saat muatan *light load*



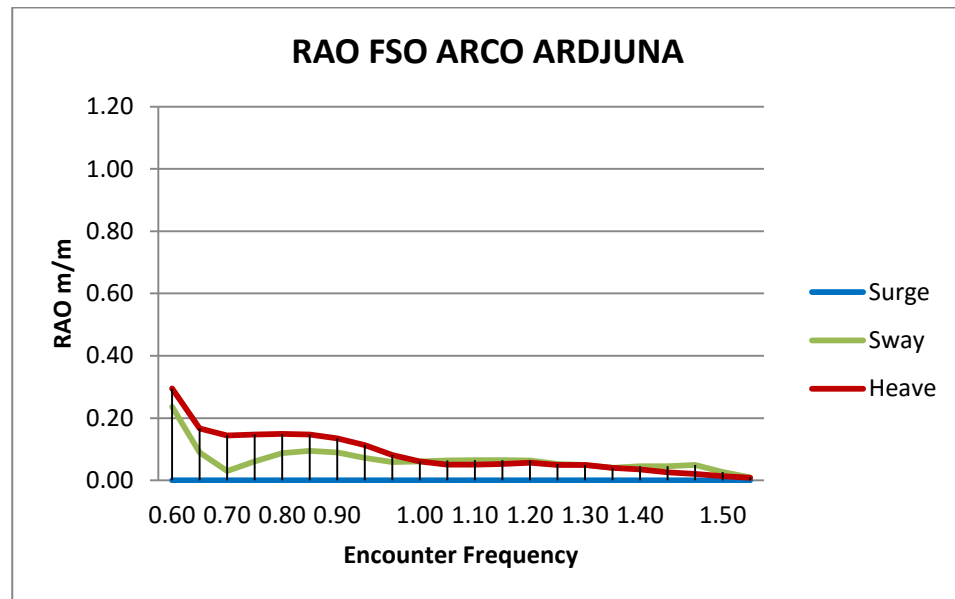
Gambar 4.10 Grafik RAO Translasi FSO Arco Ardjuna kondisi tertambat pada *heading* 0 derajat

Pada *heading* 0°, amplitudo gerakan *surge* terjadi sebesar 0.208 m/m pada frekuensi 0.8 rad/s, amplitudo gerakan *heave* sebesar 0.18 m/m pada frekuensi 0.6 rad/s dan amplitudo gerakan *sway* hampir mendekati 0.



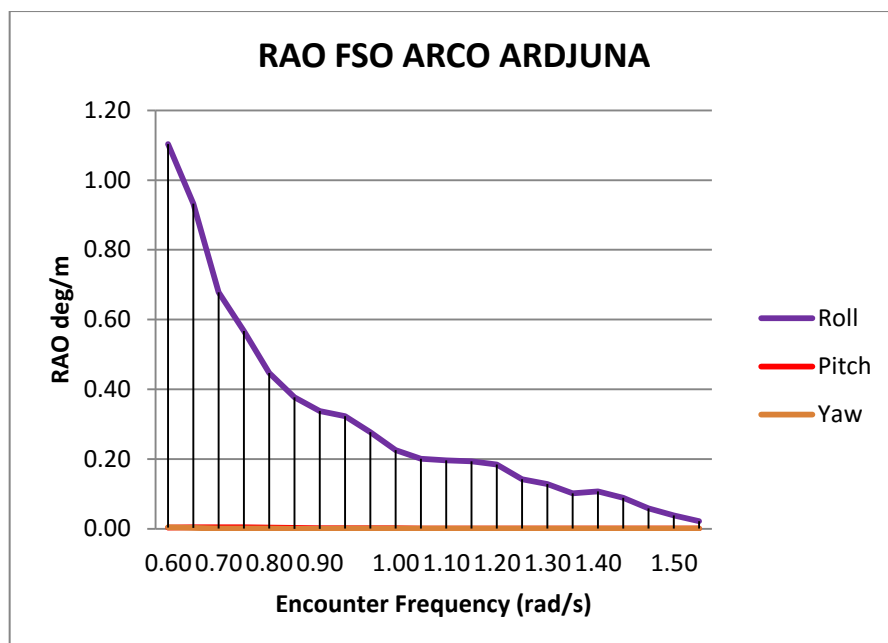
Gambar 4.11 Grafik RAO Rotasi FSO Arco Ardjuna kondisi tertambat pada *heading* 0 derajat

Pada *heading* 0° , amplitudo gerakan *pitch* terjadi sebesar 0.95 deg/m pada frekuensi 0.6 rad/s, amplitudo gerakan *roll* dan yaw hampir mendekati 0.



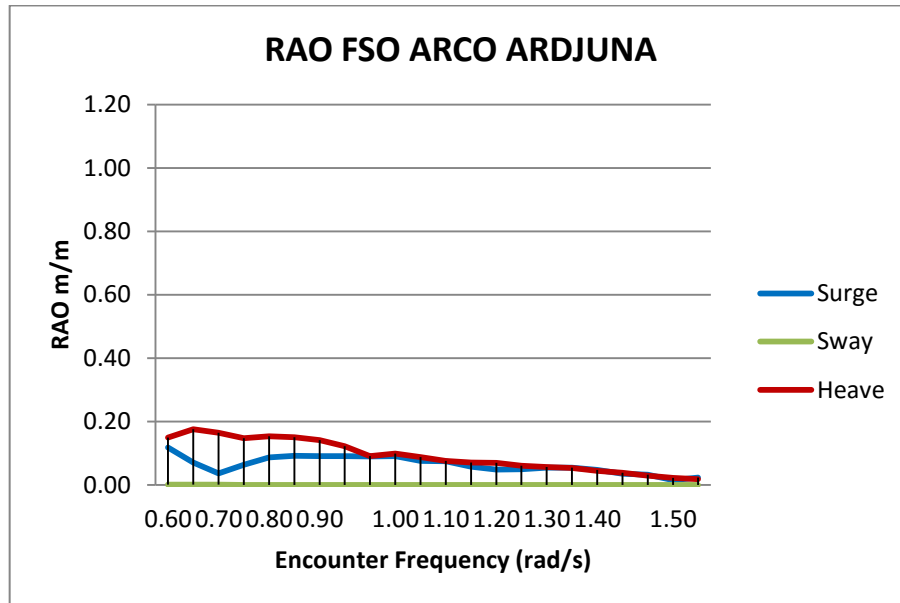
Gambar 4.12 Grafik RAO Translasi FSO Arco Ardjuna kondisi tertambat pada *heading* 90 derajat

Pada *heading* 90° , amplitudo gerakan *sway* terjadi sebesar 0.22 m/m pada frekuensi 0.6 rad/s, amplitudo gerakan *heave* sebesar 0.31 m/m pada frekuensi 0.6 rad/s dan amplitudo gerakan *surge* hampir mendekati 0.



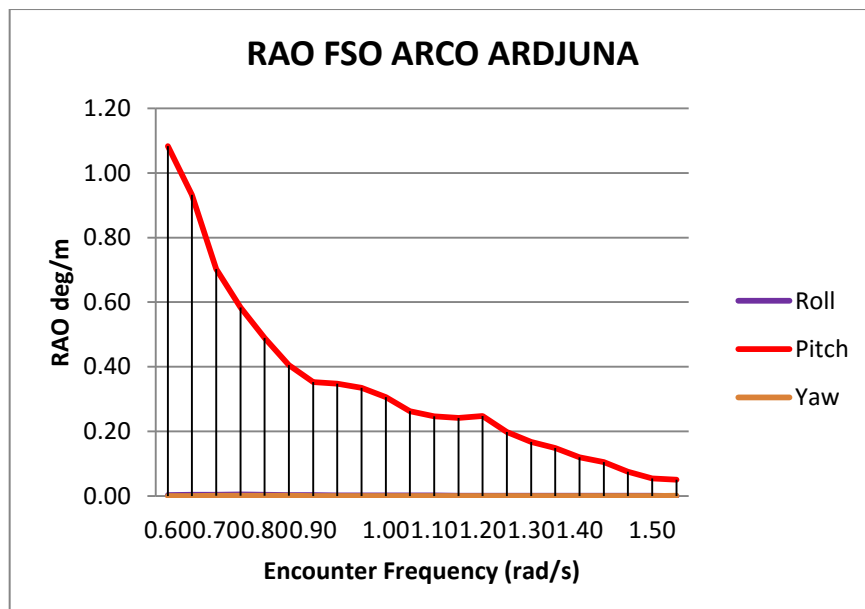
Gambar 4.13 Grafik RAO Rotasional FSO Arco Ardjuna kondisi tertambat pada *heading* 90°

Pada *heading* 90°, amplitudo gerakan *roll* terjadi sebesar 1.1 deg/m pada frekuensi 0.6 rad/s, amplitudo gerakan *pitch* dan yaw hampir mendekati 0.



Gambar 4.14 Grafik RAO Translasional FSO Arco Ardjuna kondisi tertambat pada *heading* 180°

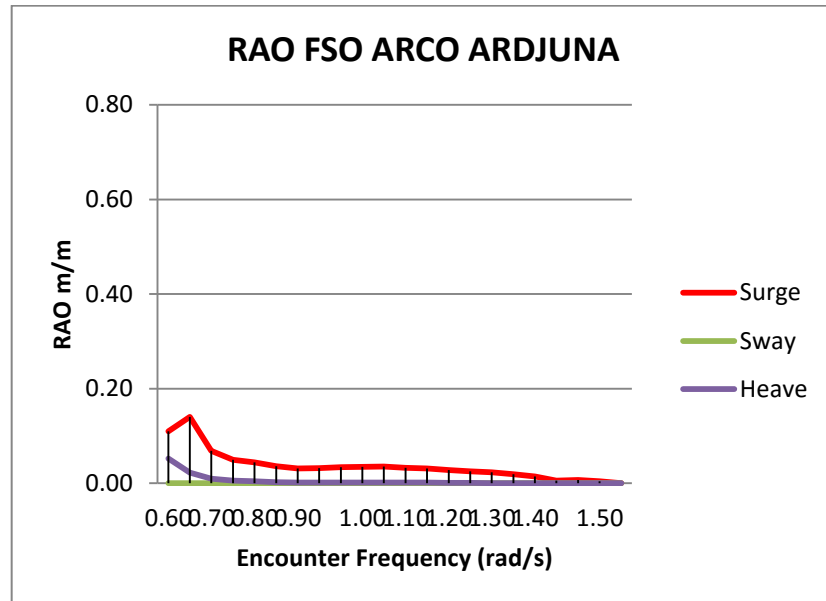
Pada *heading* 180°, amplitudo gerakan *surge* terjadi sebesar 0.13 m/m pada frekuensi 0.6 rad/s, amplitudo gerakan *heave* sebesar 0.19 m/m pada frekuensi 0.5 rad/s dan amplitudo gerakan *sway* hampir mendekati 0.



Gambar 4.15 Grafik RAO Rotasional FSO Arco Ardjuna kondisi tertambat pada *heading* 180 derajat

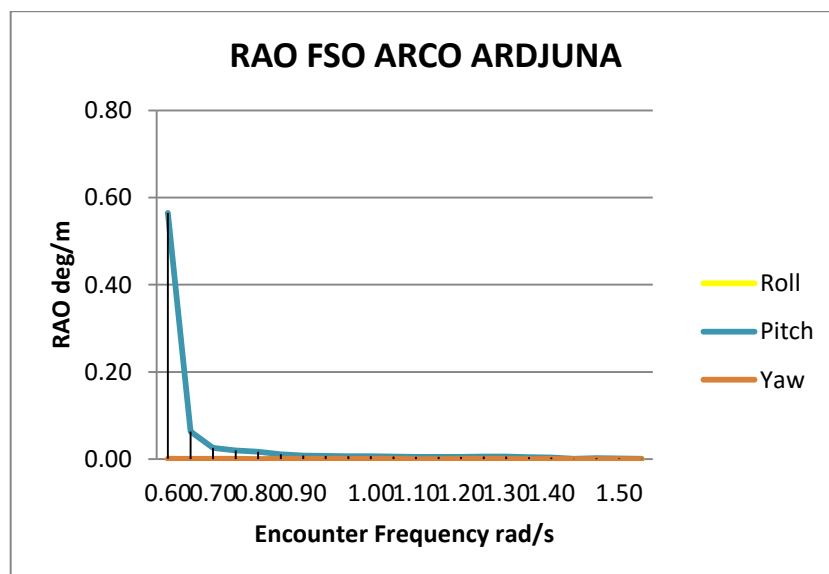
Pada *heading* 180°, amplitudo gerakan *pitch* terjadi sebesar 1.06 deg/m pada frekuensi 0.6 rad/s, amplitudo gerakan *roll* dan yaw hampir mendekati 0.

4.5.3.2 RAO FSO Arco Ardjuna kondisi muatan *full load*



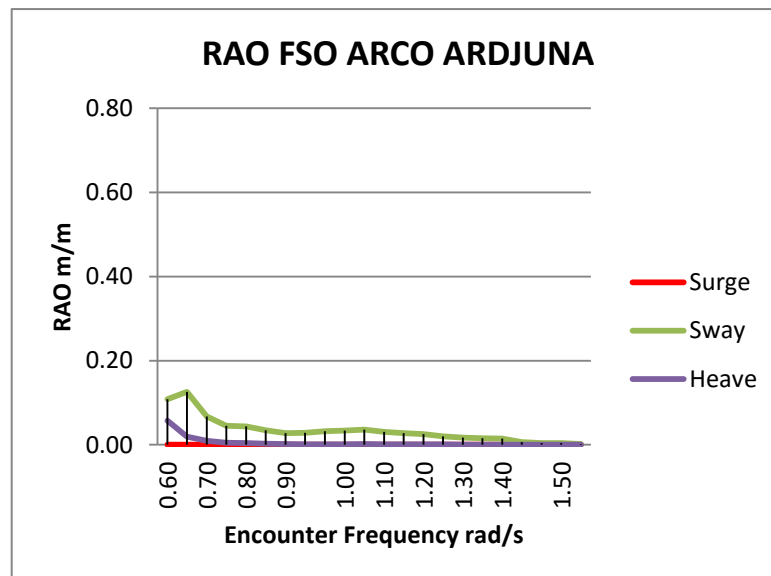
Gambar 4.16 Grafik RAO Translasi FSO Arco Ardjuna kondisi tertambat pada *heading* 0°

Pada *heading* 0°, amplitudo gerakan *surge* terjadi sebesar 0.17 m/m pada frekuensi 0.65 rad/s, amplitudo gerakan *heave* sebesar 0.05 m/m pada frekuensi 0.6 rad/s dan amplitudo gerakan *sway* hampir mendekati 0.



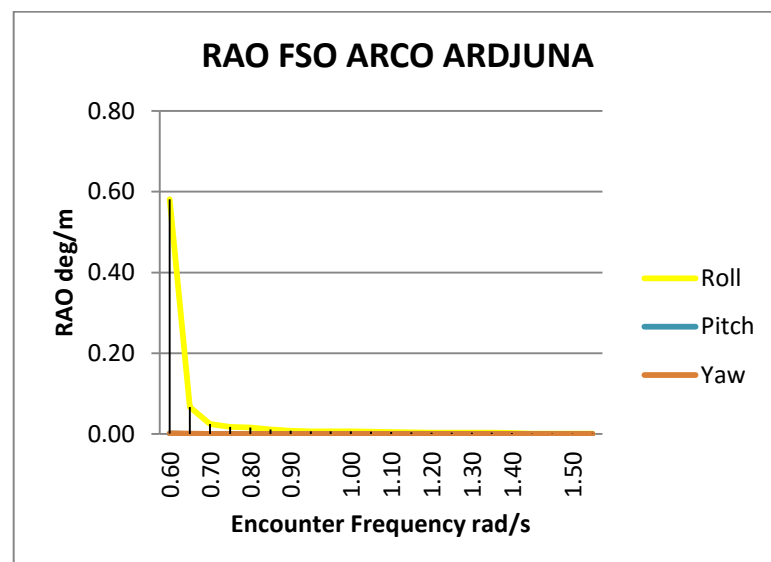
Gambar 4.17 Grafik RAO Rotasional FSO Arco Ardjuna kondisi tertambat pada *heading* 0°

Pada *heading* 0° , amplitudo gerakan *pitch* terjadi sebesar 0.48 deg/m pada frekuensi 0.6 rad/s, amplitudo gerakan *roll* dan *yaw* hampir mendekati 0.



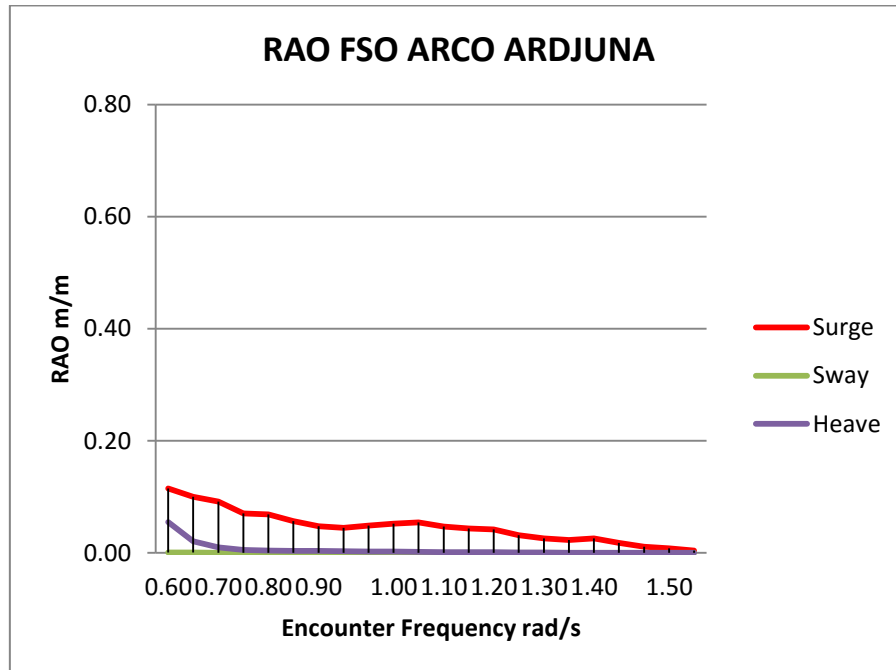
Gambar 4.18 Grafik RAO Translasi FSO Arco Ardjuna kondisi tertambat pada *heading* 90°

Pada *heading* 90° , amplitudo gerakan *sway* terbesar terjadi sebesar 0.17 m/m pada frekuensi 0.65 rad/s, amplitudo gerakan *heave* sebesar 0.06 m/m pada frekuensi 0.6 rad/s dan amplitudo gerakan *surge* hampir mendekati 0.



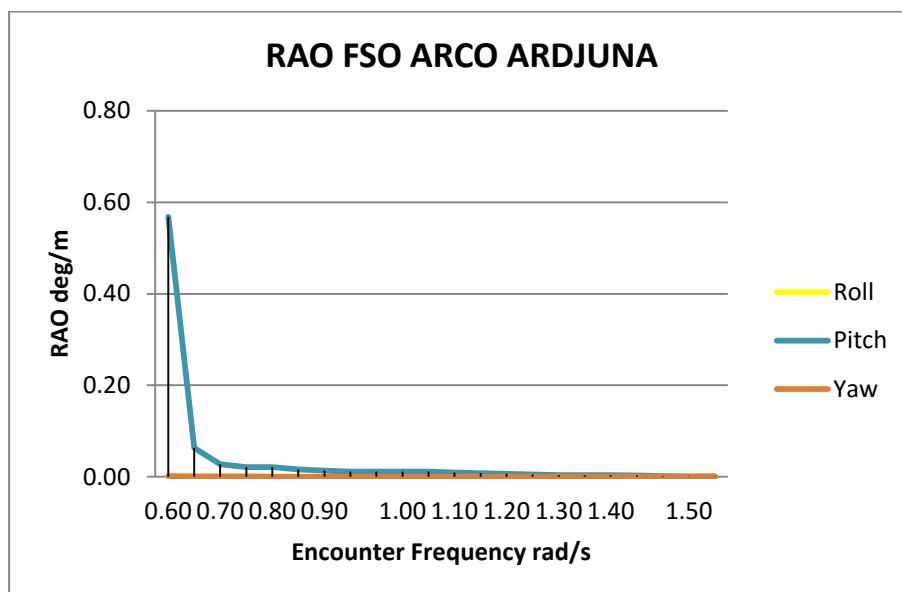
Gambar 4.19 Grafik RAO Rotasional FSO Arco Ardjuna kondisi tertambat pada *heading* 90°

Pada *heading* 90°, amplitudo gerakan *roll* terjadi sebesar 0.58 deg/m pada frekuensi 0.6 rad/s, amplitudo gerakan *pitch* dan *yaw* hampir mendekati 0.



Gambar 4.20 Grafik RAO Translasi FSO Arco Ardjuna kondisi tertambat pada *heading* 180°

Pada *heading* 180°, amplitudo gerakan *surge* terjadi sebesar 0.11 m/m pada frekuensi 0.6 rad/s, amplitudo gerakan *heave* sebesar 0.09 m/m pada frekuensi 0.5 rad/s dan amplitudo gerakan *sway* hampir mendekati 0.



Gambar 4.21 Grafik RAO Rotasional FSO Arco Ardjuna kondisi tertambat pada *heading* 180 derajat

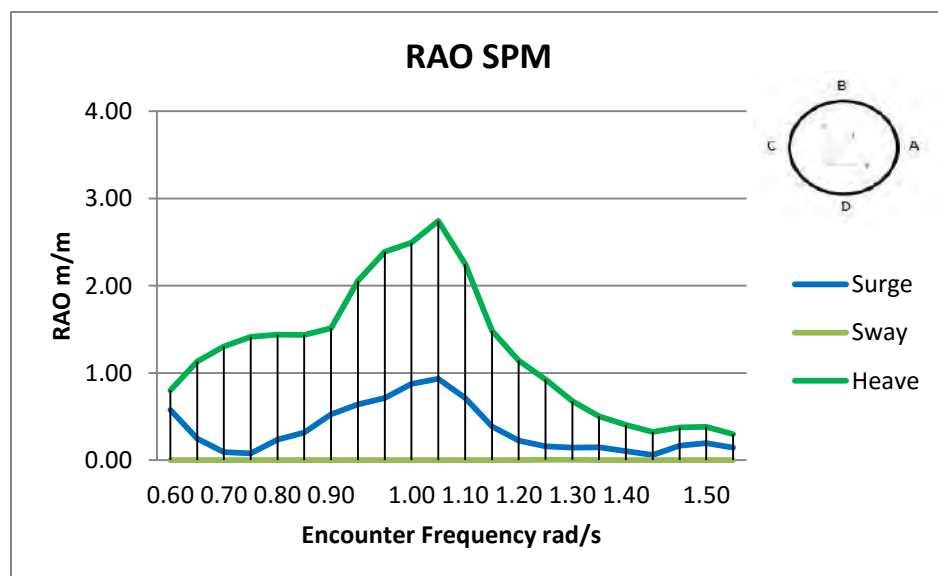
Pada *heading* 180°, amplitudo gerakan *pitch* terjadi sebesar 0.58 deg/m pada frekuensi 0.6 rad/s, sedangkan amplitudo gerakan *roll* dan *yaw* hampir mendekati 0.

Dilihat dari kurva pada Gambar 4.10 sampai Gambar 4.21, RAO tertambat yang dihasilkan pada kondisi *full load* lebih kecil dibandingkan dengan RAO pada kondisi *free floating*. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi *mooring line* dengan ukuran yang dimodelkan mampu meredam gerakan struktur FSO. Gerakan translasional terbesar yang terjadi adalah *surge* yaitu 0,21 m/m pada *heading* pembebanan 0°. Untuk gerakan rotasional terbesar adalah *pitch* yaitu 1,13 deg/m yang juga terjadi pada *heading* pembebanan 180°. Untuk amplitudo gerakan *roll* terbesar terjadi pada *heading* 90° yaitu 1,15 deg/m. Untuk gerakan *yaw* juga masih sama dengan kondisi *free floating*, hampir mendekati 0.

4.5.4. RAO Single Point Mooring 3 kondisi tertambat

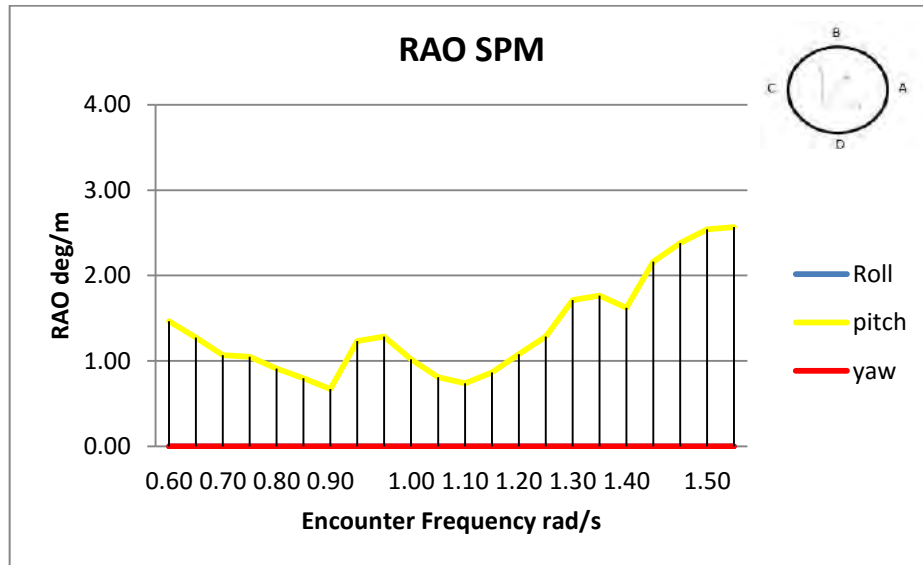
Analisis RAO pada *Single Point Mooring* dilakukan saat kondisi FSO Arco Ardjuna tertambat pada SPM ketika memiliki muatan *light load* dan *full load*. Analisis dilakukan berdasarkan *heading* pembebanan 0°, 90°, dan 180°. Hasil analisis RAO pada SPM 3 dapat dilihat pada Gambar 4.22 – Gambar 4.33

4.5.4.1. RAO kondisi FSO Light Load



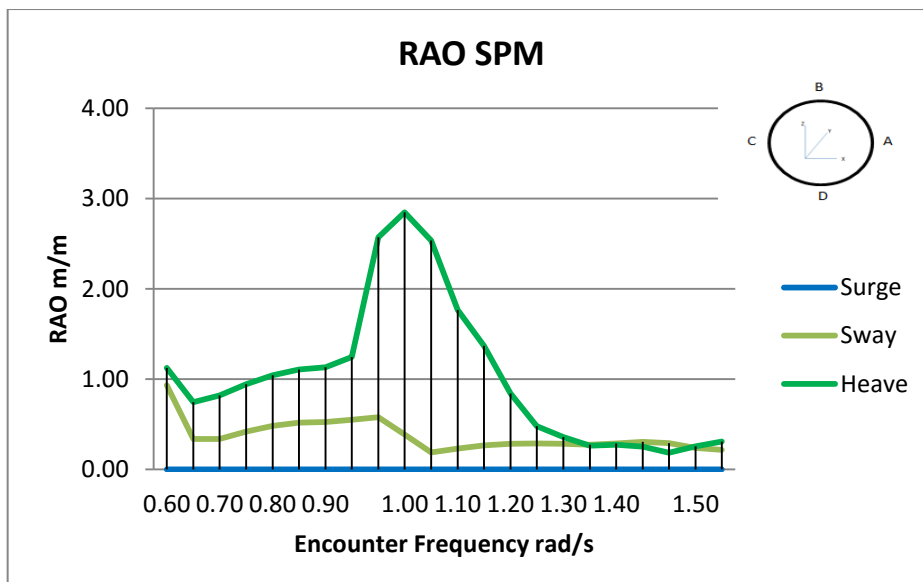
Gambar 4.22 Grafik RAO Translasi *Single Point Mooring* 3 kondisi tertambat pada *heading* 0 derajat

Pada *heading* 0° , amplitudo gerakan *surge* terjadi sebesar 0.98 m/m pada frekuensi 1.05 rad/s, amplitudo gerakan *heave* sebesar 2.74 m/m pada frekuensi 1.05 rad/s dan amplitudo gerakan *sway* hampir mendekati 0.



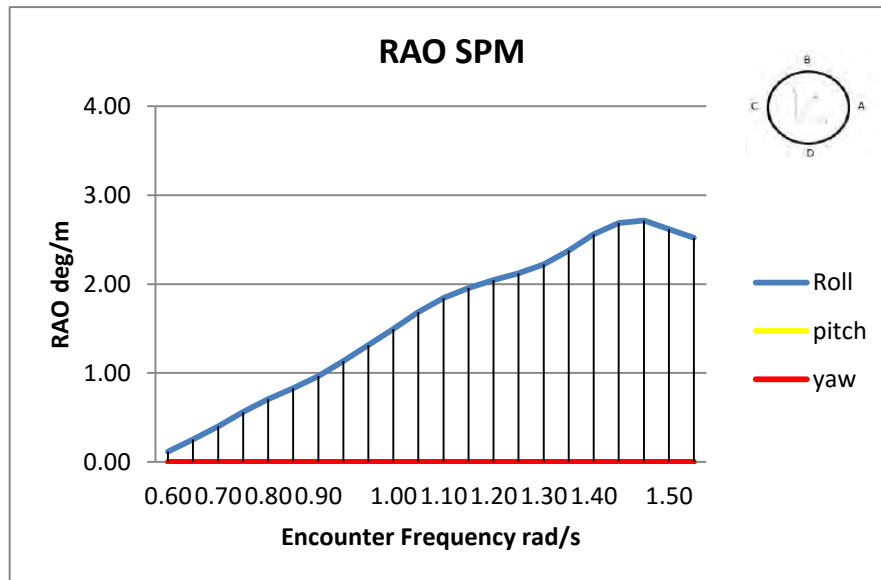
Gambar 4.23 Grafik RAO Rotasional *Single Point Mooring* 3 kondisi tertambat pada *heading* 0 derajat

Pada *heading* 0° , amplitudo gerakan *pitch* terjadi sebesar 2.57 deg/m pada frekuensi 1.55 rad/s, amplitudo gerakan *roll* dan *yaw* hampir mendekati 0.



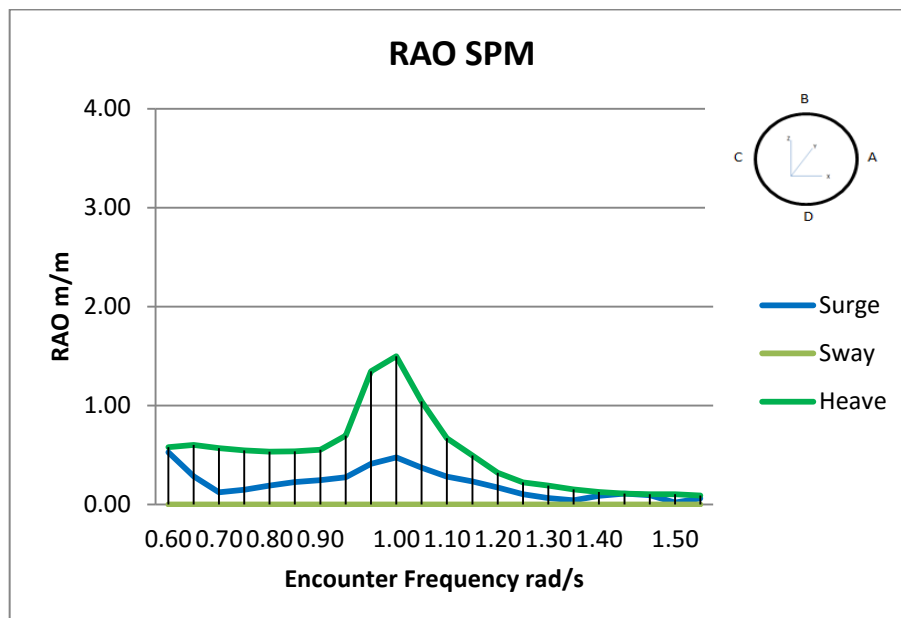
Gambar 4.24 Grafik RAO Translasi *Single Point Mooring* 3 kondisi tertambat pada *heading* 90 derajat

Pada *heading* 90°, amplitudo gerakan *sway* terbesar terjadi sebesar 0.98 m/m pada frekuensi 0.60 rad/s, amplitudo gerakan *heave* sebesar 2.85 m/m pada frekuensi 1.00 rad/s dan amplitudo gerakan *surge* hampir mendekati 0.



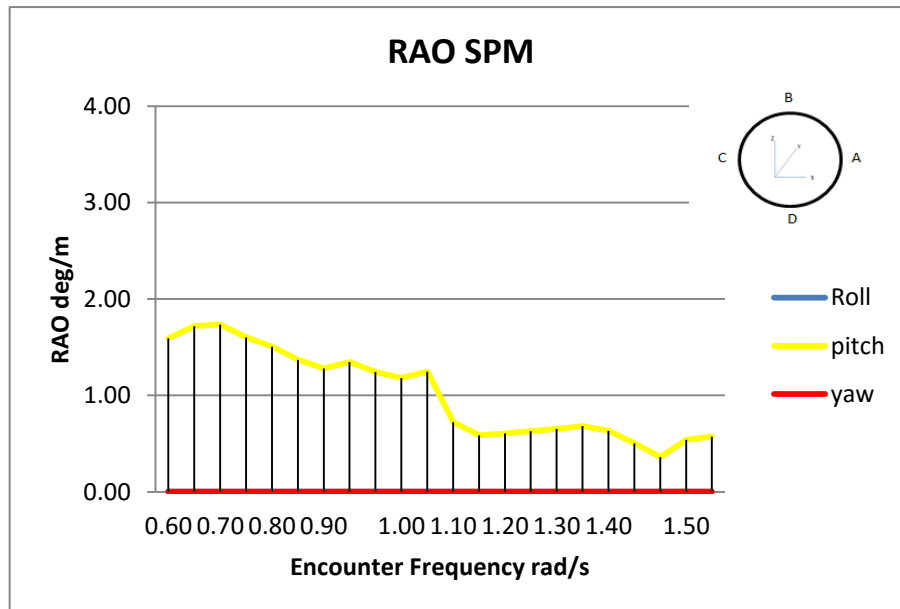
Gambar 4.25 Grafik RAO Rotasional *Single Point Mooring* 3 kondisi tertambat pada *heading* 90 derajat

Pada *heading* 90°, amplitudo gerakan *roll* terjadi sebesar 2.73 deg/m pada frekuensi 1.55 rad/s, amplitudo gerakan *pitch* dan *yaw* hampir mendekati 0.



Gambar 4.26 Grafik RAO Translasi *Single Point Mooring* 3 kondisi tertambat pada *heading* 180 derajat

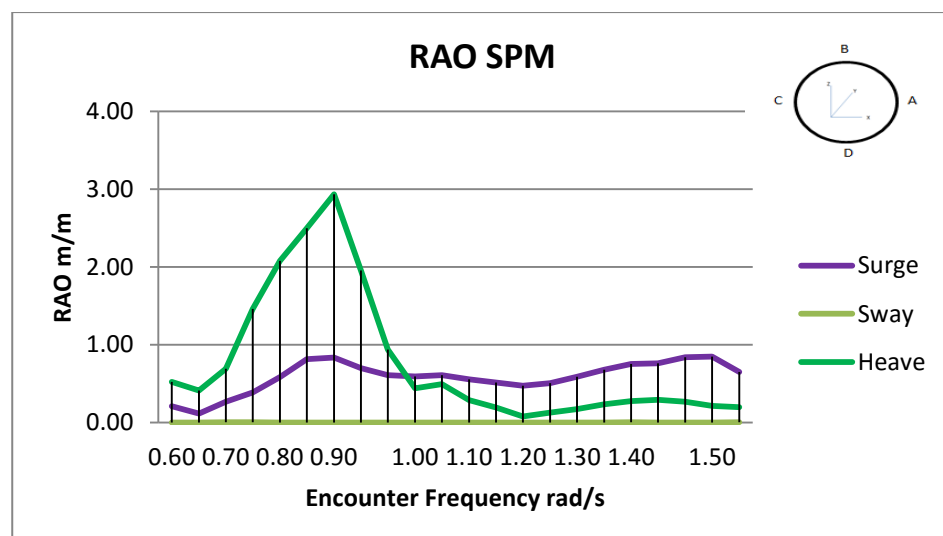
Pada *heading* 180°, amplitudo gerakan *surge* terjadi sebesar 0.60 m/m pada frekuensi 0.6 rad/s, amplitudo gerakan *heave* sebesar 1.35 m/m pada frekuensi 1.00 rad/s dan amplitudo gerakan *sway* hampir mendekati 0.



Gambar 4.27 Grafik RAO Rotasional *Single Point Mooring* 3 kondisi tertambat pada *heading* 180 derajat

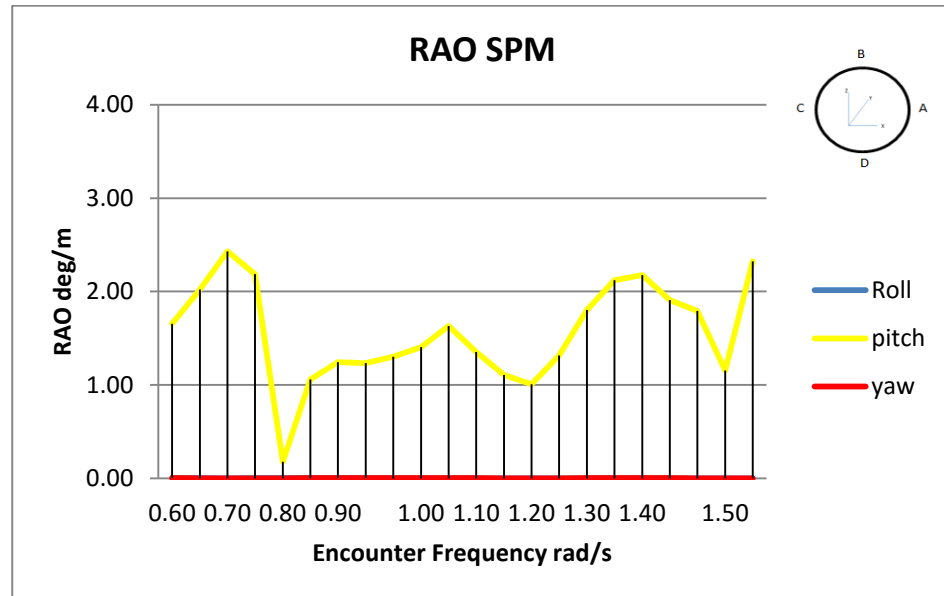
Pada *heading* 180°, amplitudo gerakan *pitch* terjadi sebesar 1.74 deg/m pada frekuensi 0.65 rad/s, sedangkan amplitudo gerakan *roll* dan yaw hampir mendekati 0.

4.5.4.2. RAO kondisi FSO *Full Load*



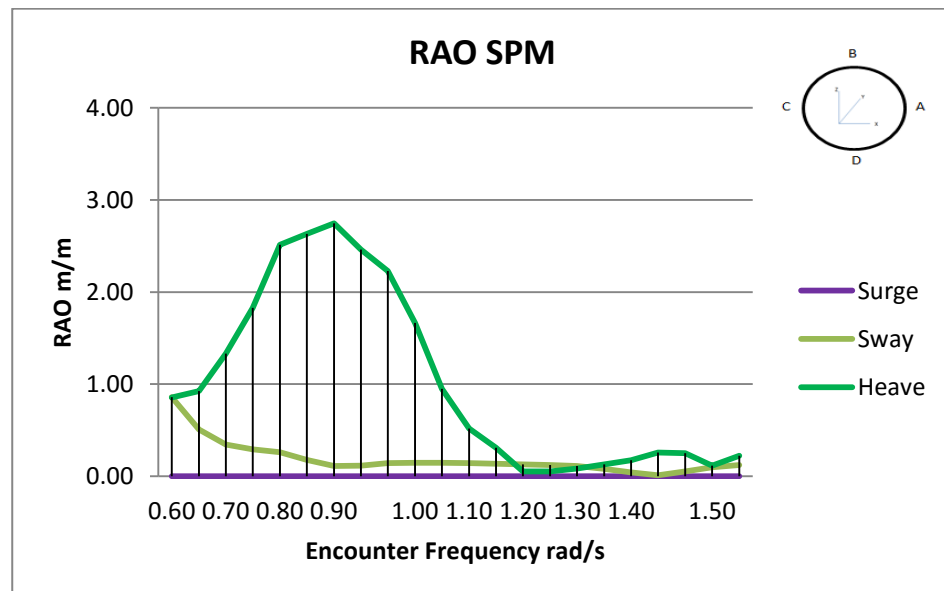
Gambar 4.28 Grafik RAO Translasi *Single Point Mooring* 3 kondisi tertambat pada *heading* 0 derajat

Pada *heading* 0° , amplitudo gerakan *surge* terjadi sebesar 0.84 m/m pada frekuensi 1.50 rad/s, amplitudo gerakan *heave* sebesar 2.93 m/m pada frekuensi 0.90 rad/s dan amplitudo gerakan *sway* hampir mendekati 0.



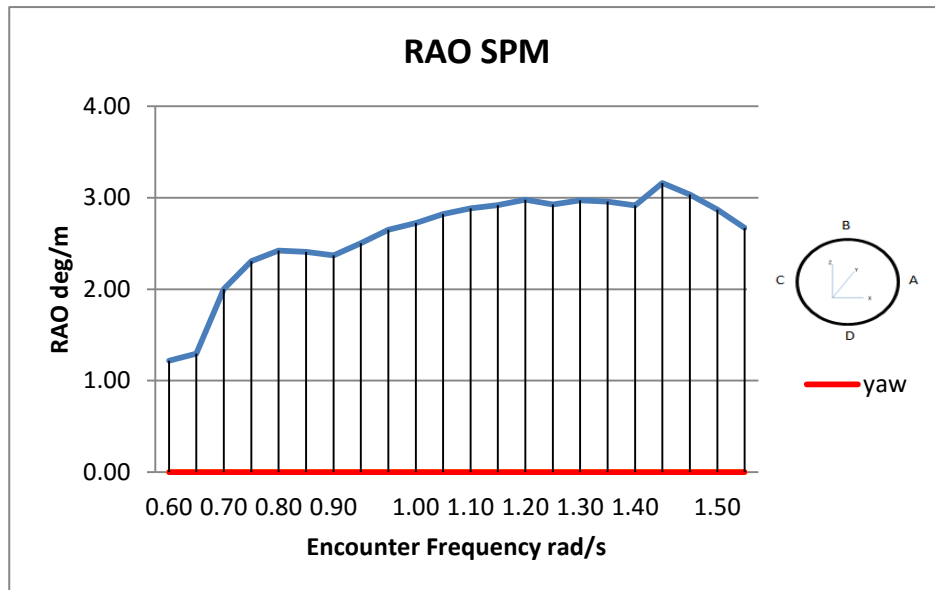
Gambar 4.29 Grafik RAO Rotasional Single Point Mooring 3 kondisi tertambat pada *heading* 0 derajat

Pada *heading* 0° , amplitudo gerakan *pitch* terjadi sebesar 2.43 deg/m pada frekuensi 0.70 rad/s, amplitudo gerakan *roll* dan *yaw* hampir mendekati 0.



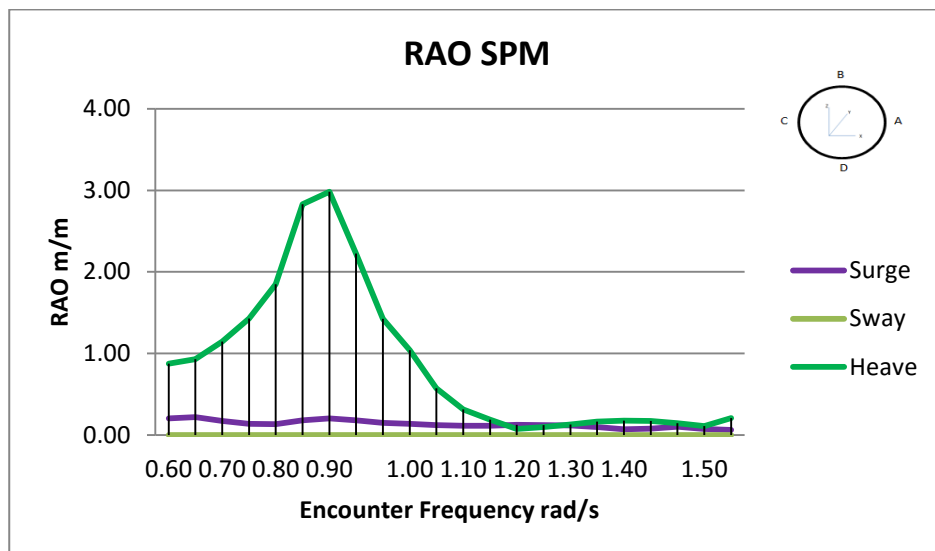
Gambar 4.30 Grafik RAO Translasi Single Point Mooring 3 kondisi tertambat pada *heading* 90 derajat

Pada *heading* 90°, amplitudo gerakan *sway* terbesar terjadi sebesar 0.97 m/m pada frekuensi 0.60 rad/s, amplitudo gerakan *heave* sebesar 2.75 m/m pada frekuensi 0.90 rad/s dan amplitudo gerakan *surge* hampir mendekati 0.



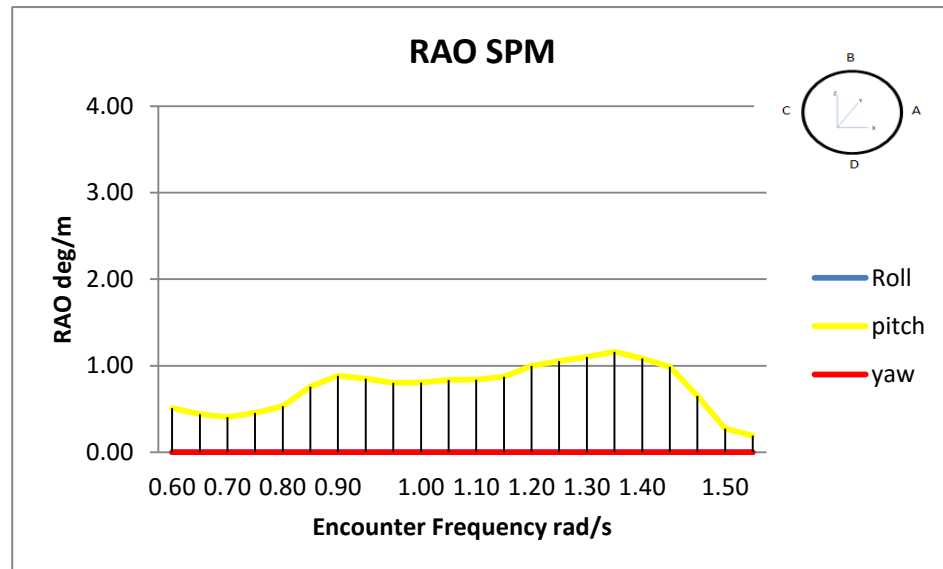
Gambar 4.31 Grafik RAO Rotasional *Single Point Mooring* 3 kondisi tertambat pada *heading* 90 derajat

Pada *heading* 90°, amplitudo gerakan *roll* terjadi sebesar 3.16 deg/m pada frekuensi 1.45 rad/s, amplitudo gerakan *pitch* dan yaw hampir mendekati 0.



Gambar 4.32 Grafik RAO Translasi *Single Point Mooring* 3 kondisi tertambat pada *heading* 180 derajat

Pada *heading* 180°, amplitudo gerakan *surge* terjadi sebesar 0.23 m/m pada frekuensi 0.6 rad/s, amplitudo gerakan *heave* sebesar 2.83 m/m pada frekuensi 0.90 rad/s dan amplitudo gerakan *sway* hampir mendekati 0.



Gambar 4.33 Grafik RAO Rotasional *Single Point Mooring* 3 kondisi tertambat pada *heading* 180 derajat

Pada *heading* 180°, amplitudo gerakan *pitch* terjadi sebesar 1.16 deg/m pada frekuensi 1.35 rad/s, sedangkan amplitudo gerakan *roll* dan *yaw* hampir mendekati 0.

Berdasarkan Gambar 4.22 sampai Gambar 4.33 di atas, dapat dilihat bahwa *surge* tertinggi ialah sebesar 0,63 (m/m) yaitu pada *heading* 0°, *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 0,934 (m/m), dan *heave* tertinggi sebesar 2.968 (m/m) pada *heading* 180°. Untuk gerak osilasi rotasional *roll* maksimum pada *heading* 90° sebesar 2.159 (deg/m), *pitch* maksimum sebesar 2.43 (deg/m) pada *heading* 0°, dan *yaw* mendekati nilai 0. Dari analisis RAO yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pergerakan struktur FSO dan SPM dalam konfigurasi tertambat terbesar terjadi seperti pada Tabel 4.9 dan Tabel 4.10

Tabel 4.9 RAO Maksimum kondisi FSO Arco Ardjuna tertambat pada SPM (muatan *light load*)

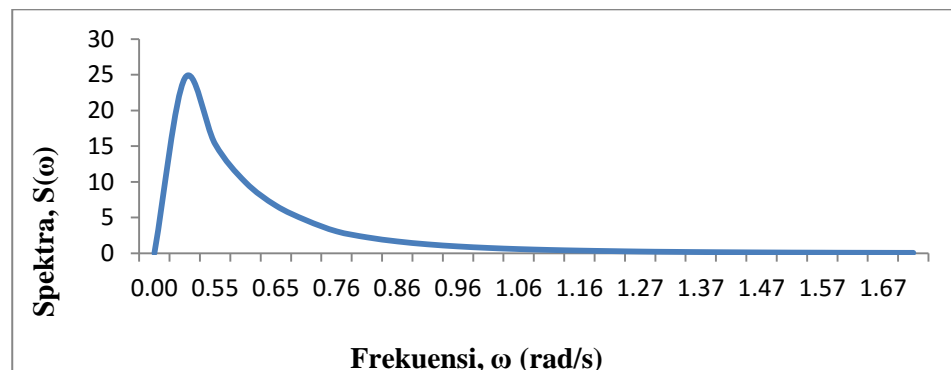
RAO Maksimum (kondisi <i>mooring</i>) - <i>light load</i>							
Moda Gerakan	Unit	FSO			SPM		
		0	90	180	0	90	180
Surge	m/m	0.19	0.0015	0.18	0.95	0.000	0.5
Sway	m/m	0.000	0.22	0.000	0.000	0.98	0.000
Heave	m/m	0.182	0.23	0.191	2.81	2.9	1.53
Roll	deg/m	0.004	1.1	0.000	0.000	2.82	0.000
Pitch	deg/m	0.947	0.000	1.1	2.72	0.000	1.72
Yaw	deg/m	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabel 4.10 RAO Maksimum kondisi FSO Arco Ardjuna tertambat pada SPM (muatan *full load*)

RAO Maksimum (kondisi <i>mooring</i>) - <i>full load</i>							
Moda Gerakan	Unit	FSO			SPM		
		0	90	180	0	90	180
Surge	m/m	0.18	0.000	0.12	0.72	0.000	0.34
Sway	m/m	0.000	0.11	0.000	0.000	0.88	0.000
Heave	m/m	0.098	0.1	0.087	2.98	2.89	2.98
Roll	deg/m	0.000	0.57	0.000	0.000	3.12	0.000
Pitch	deg/m	0.58	0.000	0.578	2.33	0.000	0.98
Yaw	deg/m	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

4.6. Spektrum Gelombang

Pemilihan spektrum gelombang untuk analisis respon gerak struktur pada gelombang acak adalah berdasarkan kondisi real laut yang ditinjau. Dari beberapa jenis spektrum gelombang, yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah Spektrum JONSWAP. Pemilihan spektrum JONSWAP ini di-dasarkan pada penentuan yang ada pada Chakrabarti (1987) yang telah dibahas pada BAB II. Gambar 4.34 di bawah ini menunjukkan grafik spektra JONSWAP. Selain itu, pada DNV RP C205 juga dijelaskan bahwa spektrum JONSWAP diaplikasikan pada perairan dengan : $T_p / (H_s)^{1/2} \leq 3.6$, $\gamma = 5$



Gambar 4.34 Spektrum Gelombang JONSWAP Perairan Laut Jawa dengan $H_s = 1,8$ m

Pada analisis ini akan ditentukan respon strukur dari FSO dan SPM sebagai

respon kerapatan energi pada struktur akibat gelombang. Spektra respons didapatkan dengan cara mengkalikan harga spektra gelombang dengan RAO kuadrat. Maka grafik respon struktur pada enam derajat kebebasan yang dihasilkan adalah sebagai berikut :

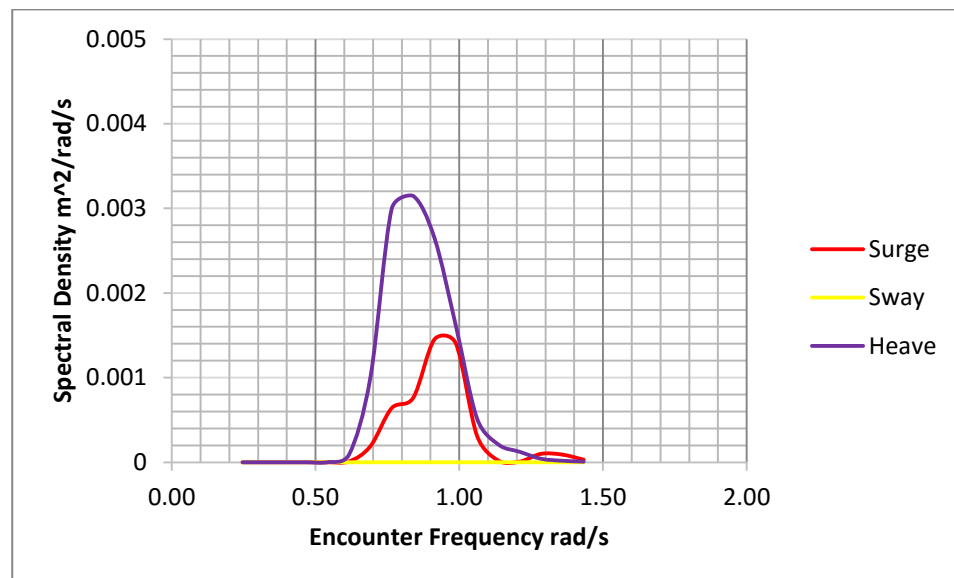
$$RAO^2 \times S(\omega) = S_r(\omega)$$

Sama halnya dengan penjelasan analisis perilaku gerak di gelombang regular (RAO) pada bahasan sebelumnya, penjelasan hasil analisis perilaku gerak di gelombang acak juga akan dijabarkan sesuai dengan kondisi muatan yang ditinjau. Berikut adalah penjelasannya secara lebih lengkap.

4.7. Respon Spektra FSO Arco Ardjuna

Perhitungan respon spektra pada FSO Arco Ardjuna dilakukan pada kondisi muatan *Light Load* maupun *Full Load* dengan kedalaman laut 45 m saat tertambat pada SPM. Grafik respon spektra pada FSO dilakukan untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll* dan *pitch*. Berikut adalah grafik respon spektra pada FSO Arco Ardjuna dengan *heading* pembebanan 0° , 90° dan 180° dapat dilihat pada Gambar 4.35 sampai Gambar 4.46 di bawah ini.

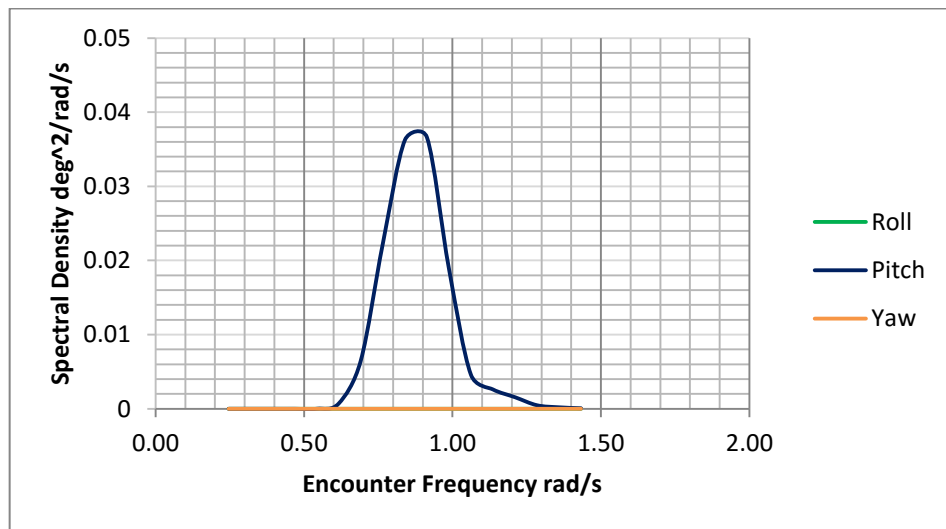
4.7.1. Respon Spektra FSO kondisi muatan *light load*



Gambar 4.35 Respon Spektra FSO secara translasional pada kondisi *Light Load* saat *heading angle* 0 derajat

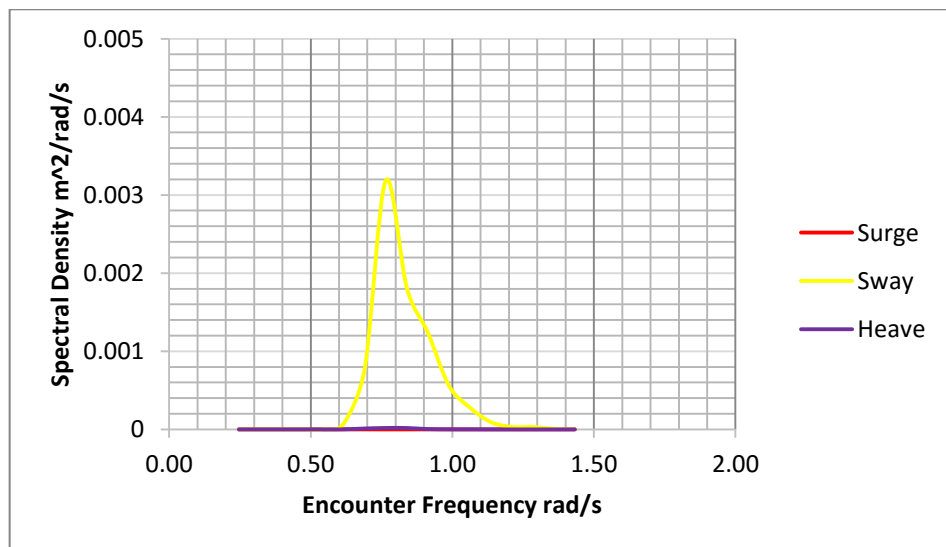
Dari Gambar 4.35 yang telah ditampilkan maka dapat disimpulkan bahwa respon struktur FSO kondisi *light load* pada kondisi operasi (gelombang 1 yrs)

di perairan Laut Jawa akibat gelombang arah 0° yang paling besar adalah gerakan *Heave* dan *Surge*, dan nilai gerakan *sway* hampir mendekati nol.



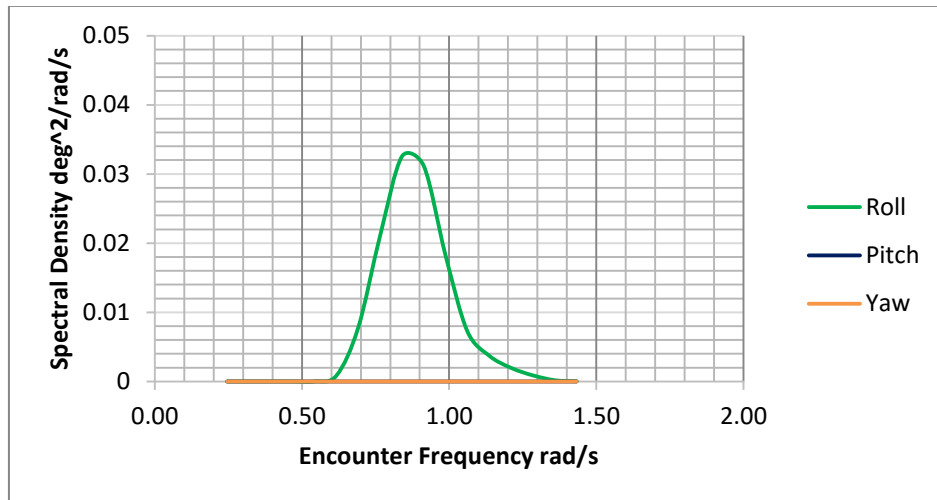
Gambar 4.36 Respon Spektra FSO secara rotasional pada kondisi *Light Load* saat *heading angle* 0 derajat

Dari Gambar 4.36 yang telah ditampilkan maka dapat disimpulkan bahwa respon struktur FSO kondisi *light load* pada kondisi operasi (gelombang 1 yrs) di perairan Laut Jawa akibat gelombang arah 0° secara rotasional yang paling besar adalah gerakan *Pitching*, sedangkan gerakan *Roll* dan *Yaw* hampir mendekati nol. Karena arah pergerakan gelombang sejajar dengan arah pergerakan kapal.



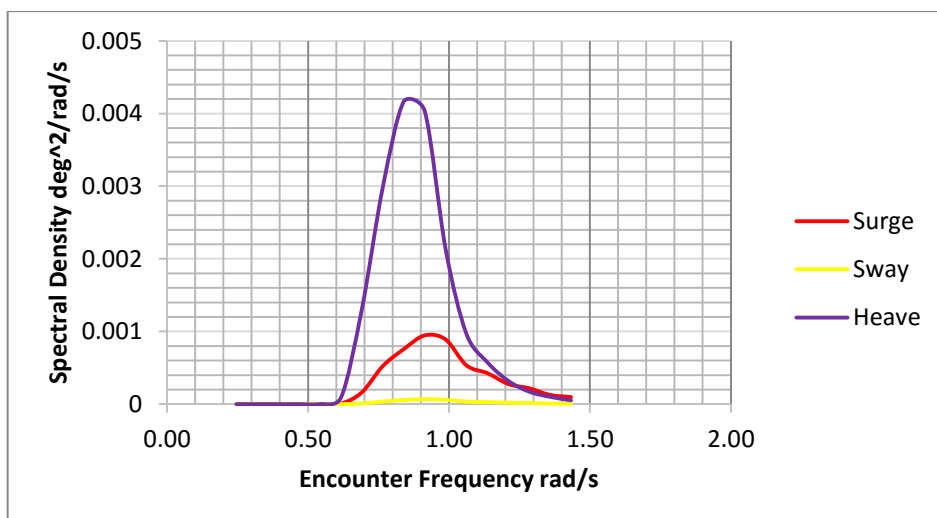
Gambar 4.37 Respon Spektra FSO secara translasional pada kondisi *Light Load* saat *heading angle* 90 derajat

Dari Gambar 4.37 yang telah ditampilkan maka dapat dilihat bahwa respon struktur FSO kondisi *light load* pada kondisi operasi (gelombang 1 yrs) di perairan Laut Jawa akibat gelombang arah 90° yang paling besar adalah gerakan *Sway*, sedangkan gerakan *Surge* dan *Heave* hampir mendekati nol. Hal ini terjadi akibat arah pergerakan gelombang tegak lurus dengan arah pergerakan kapal.

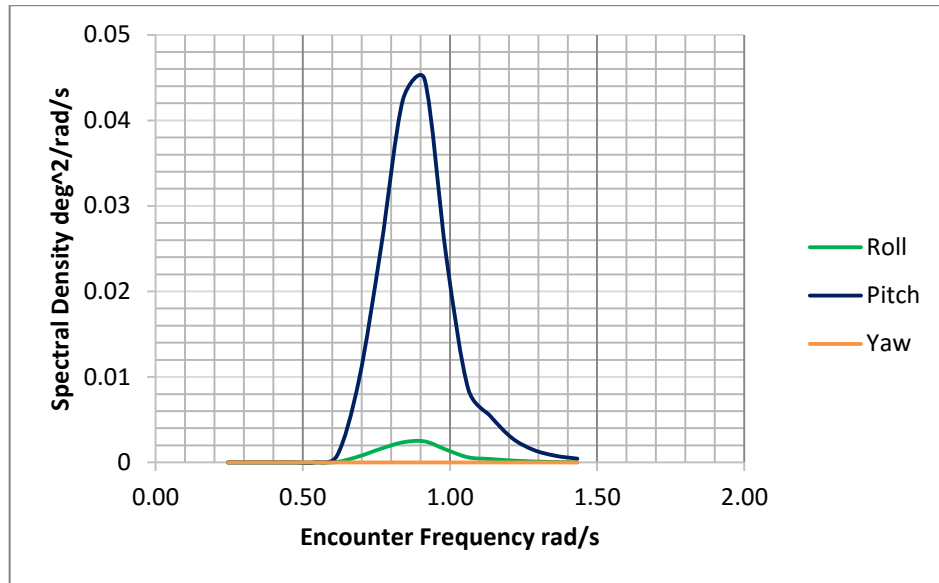


Gambar 4.38 Respon Spektra FSO secara rotasional pada kondisi *Light Load* saat *heading angle* 90 derajat

Dari Gambar 4.38 yang telah ditampilkan maka dapat dilihat bahwa respon struktur FSO kondisi *light load* pada kondisi operasi (gelombang 1 yrs) di perairan Laut Jawa akibat gelombang arah 90° secara rotasional yang paling besar adalah gerakan *Roll*, sedangkan gerakan *Pitch* dan *Yaw* hampir mendekati nol.



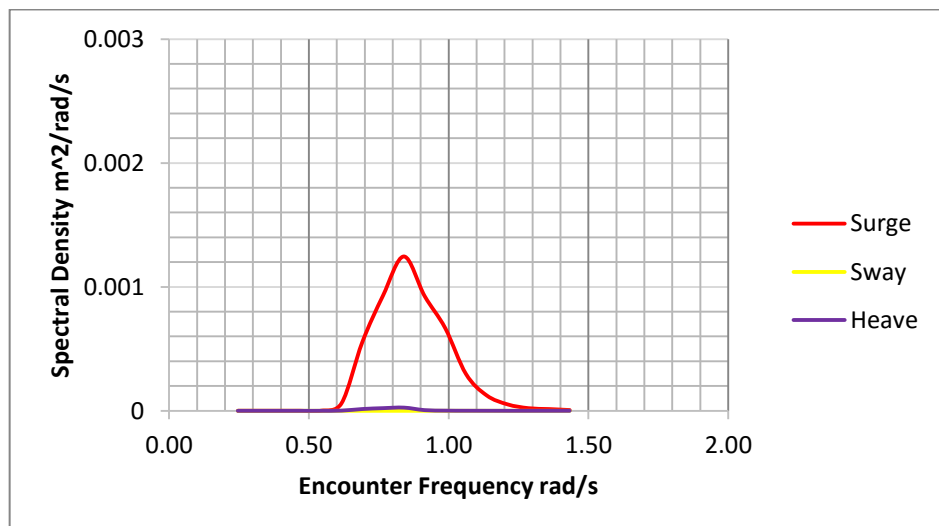
Gambar 4.39 Respon Spektra FSO secara translasional pada kondisi *Light Load* saat *heading angle* 180 derajat



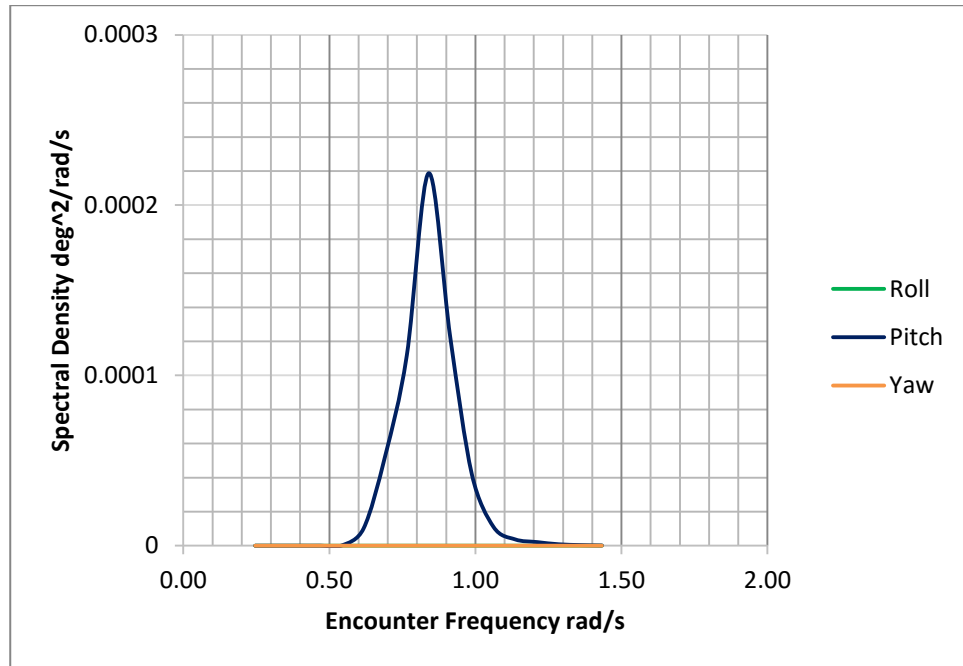
Gambar 4.40 Respon Spektra FSO secara rotasional pada kondisi *Light Load* saat *heading angle* 0 derajat

Dari Gambar 4.38 yang telah ditampilkan maka dapat dilihat bahwa respon struktur FSO kondisi *light load* pada kondisi operasi (gelombang 1 yrs) di perairan Laut Jawa akibat gelombang arah 90° secara rotasional yang paling besar adalah gerakan *Roll*, sedangkan gerakan *Pitch* dan *Yaw* hampir mendekati nol.

4.7.2. Respon Spektra FSO Arco Ardjuna saat kondisi Full Load

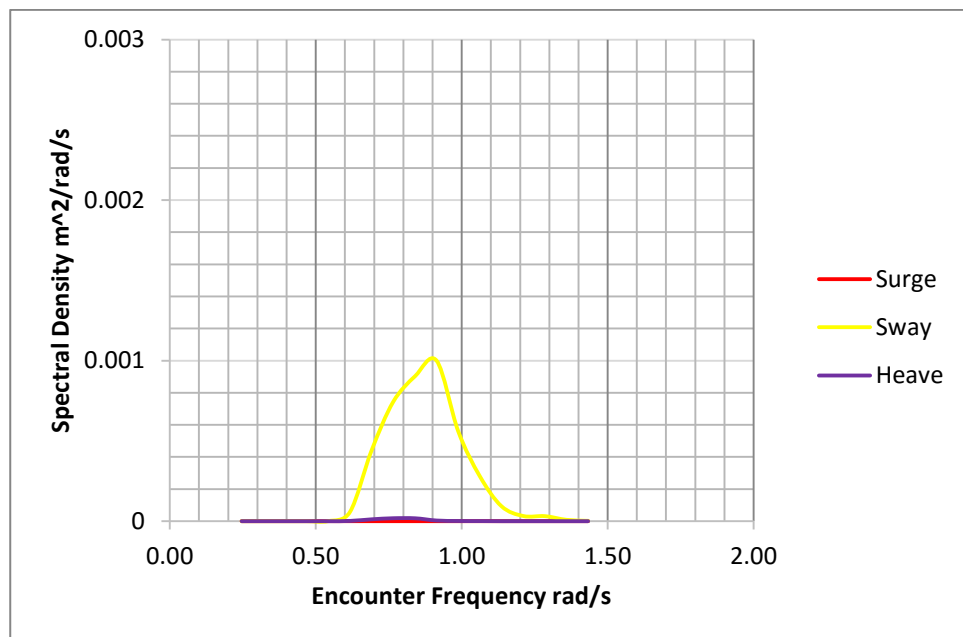


Gambar 4.41 Respon Spektra gerakan *translasional* FSO Arco Ardjuna pada kondisi *Full Load* di *Heading Angle* 0

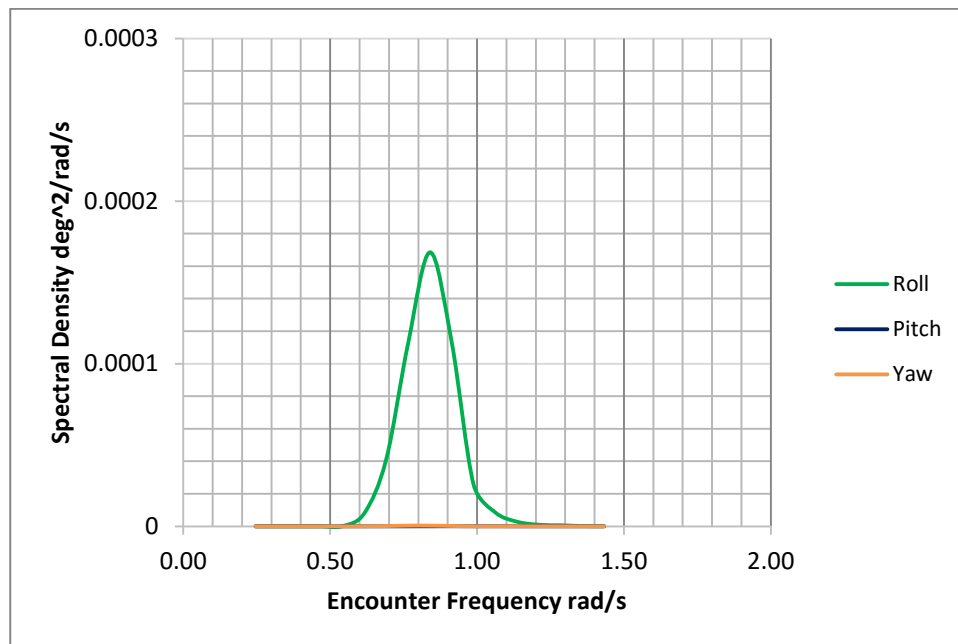


Gambar 4.42 Respon Spektra gerakan *rotasional* FSO Arco Ardjuna pada kondisi *Full Load* di *Heading Angle* 0

Dari **Gambar 4.41** dan **Gambar 4.42** yang telah ditampilkan dapat dilihat bahwa respon struktur FSO kondisi *full load* akibat beban operasi dan arah datang gelombang 0° memiliki nilai gerakan terbesar di *Surge* dan *Pitch*. Hal ini terjadi akibat pergerakan gelombang sejajar dengan arah pergerakan FSO.

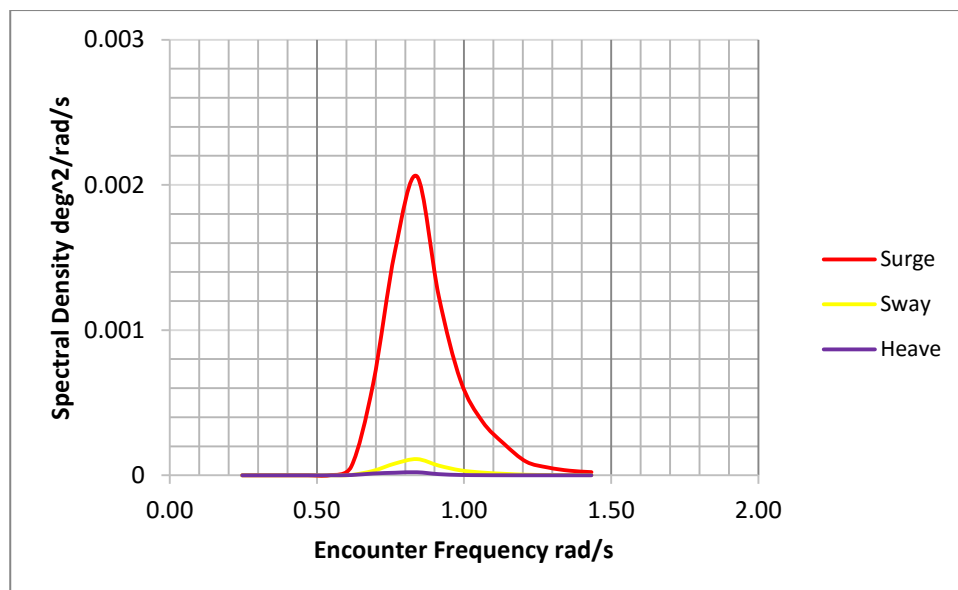


Gambar 4.43 Respon Spektra gerakan *translasional* FSO Arco Ardjuna pada kondisi *Full Load* di *Heading Angle* 90

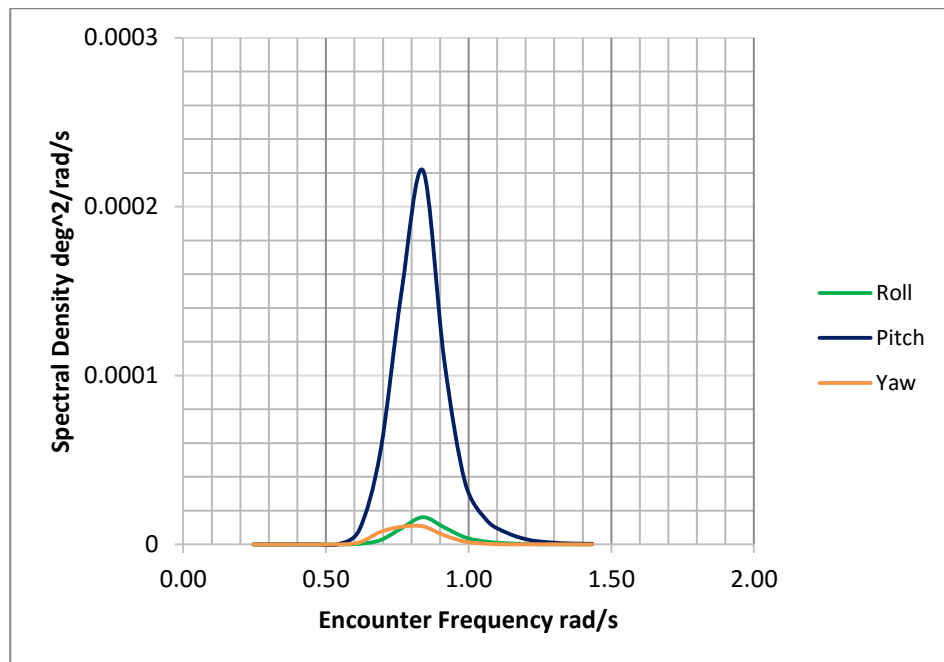


Gambar 4.44 Respon Spektra gerakan *rotasional* FSO Arco Ardjuna pada kondisi *Full Load* di *Heading Angle* 90

Dari **Gambar 4.43** dan **Gambar 4.44** yang telah ditampilkan dapat dilihat bahwa respon struktur FSO kondisi *full load* akibat beban operasi dan arah datang gelombang 90° memiliki nilai gerakan terbesar di *Sway* dan *Roll*. Hal ini terjadi akibat arah pergerakan gelombang tegak lurus dengan arah pergerakan FSO.



Gambar 4.45 Respon Spektra gerakan *translational* FSO Arco Ardjuna pada kondisi *Full Load* di *Heading Angle* 180



Gambar 4.46 Respon Spektra gerakan *rotasional* FSO Arco Ardjuna pada kondisi *Full Load* di *Heading Angle* 180

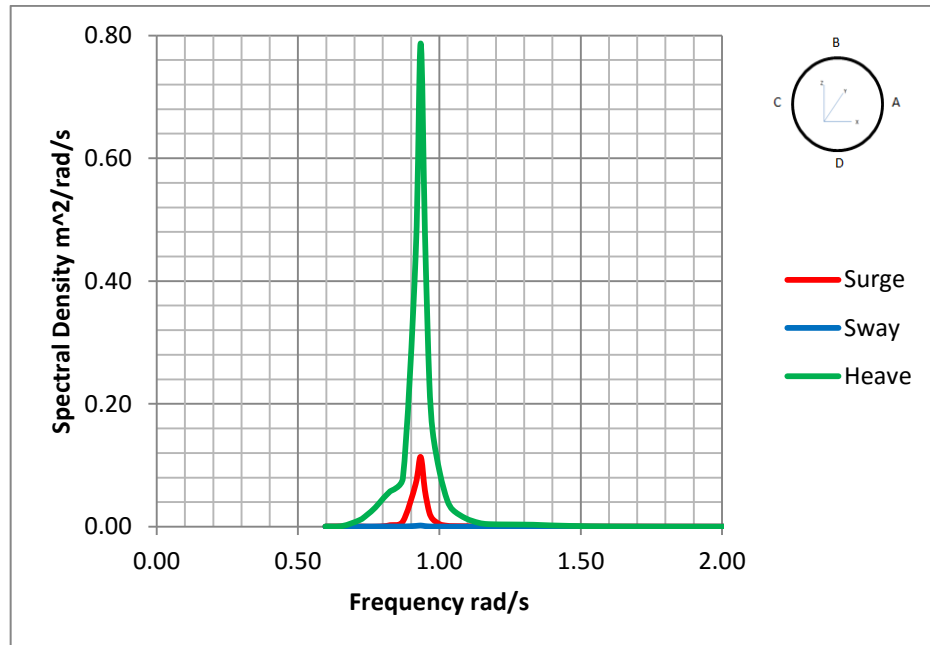
Dari kurva pada Gambar 4.35 sampai Gambar 4.46, dapat dilihat bahwa respon spektra pada kondisi *light load* lebih besar daripada kondisi *full load*. Hal ini dikarenakan gerakan FSO saat kondisi *full load* lebih stabil jika dibandingkan saat kondisi kosong (*light load*), sehingga RAO pada kondisi *full load* dengan nilai yang lebih kecil menghasilkan respon struktur yang lebih kecil pula. Pada kondisi *full load*, respon struktur terbesar terjadi pada *heading* 90° yaitu pada gerakan *sway* dan *roll* dengan nilai respon struktur *sway* sebesar 0,0012 m²/(rad/s) dan nilai respon struktur *roll* sebesar 0,00083 deg²/(rad/s). Saat kondisi *light load* karakteristik respon struktur FSO terjadi kemiripan dengan saat kondisi *full load* untuk arah *heading* dengan respon struktur terbesar yaitu 90°. Respon struktur terbesar terjadi saat gerakan *heave* $SR(\omega)_{pitch} = 0.0448 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$, dan *roll* $SR(\omega)_{roll} = 0.032 \text{ deg}^2/(\text{rad/s})$.

4.8. Respon Spektra *Single Point Mooring* (SPM) 3

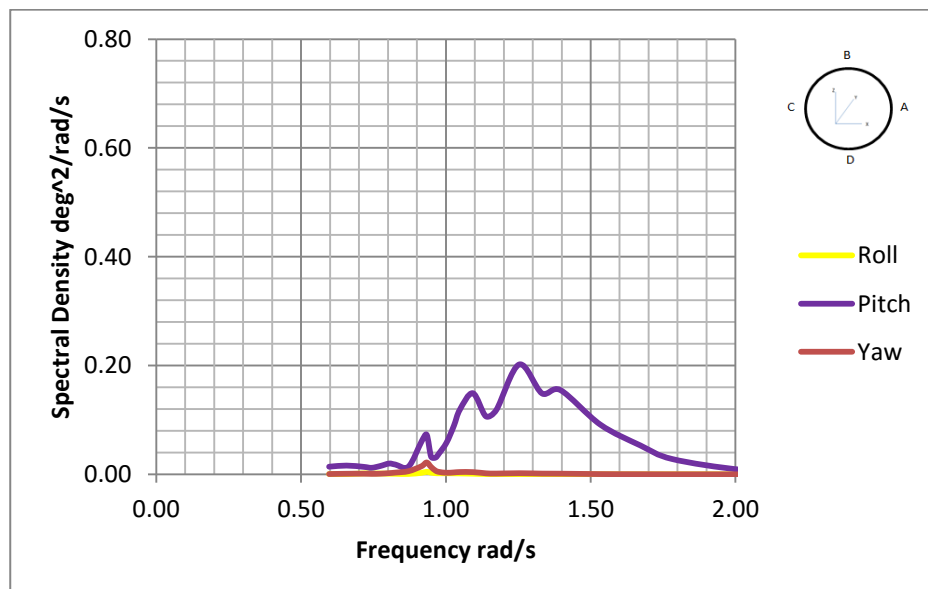
Perhitungan respon spektra pada *Single Point Mooring* (SPM) 3 dilakukan pada kondisi FSO Arco Ardjuna muatan *Light Load* maupun *Full Load* dengan kedalaman laut 45 m. Grafik respon spektra pada SPM 3 dilakukan untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll* dan *pitch*. Berikut adalah grafik respon spektra

pada *Single Point Mooring* (SPM) 3 dengan *heading* pembebanan 0° , 90° dan 180° dapat dilihat pada Gambar 4.47 sampai Gambar 4.58 di bawah ini.

4.8.1. Respon Spektra *Single Point Mooring* 3 ketika muatan FSO *Light Load*

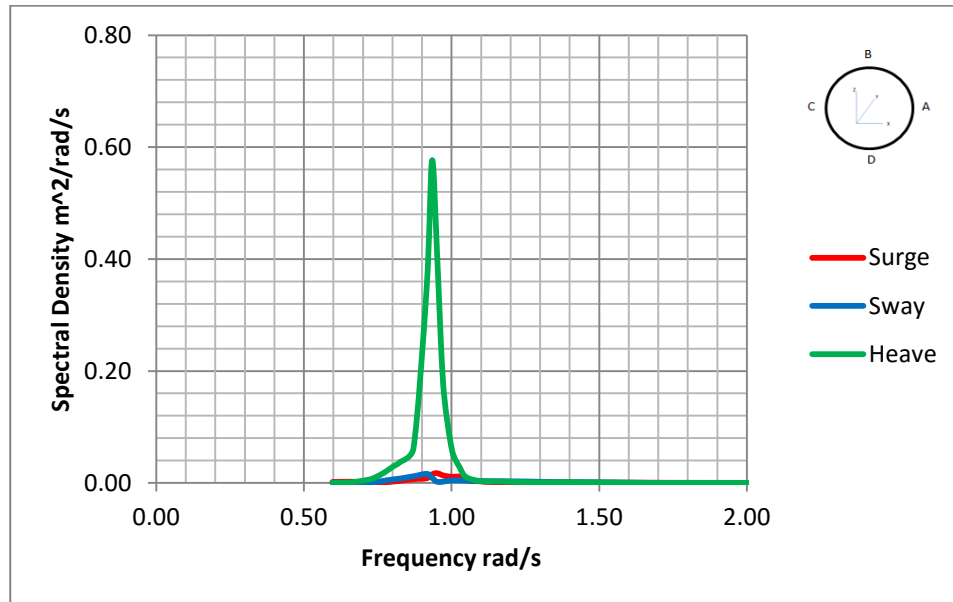


Gambar 4.47 Respon Spektra gerakan *translational* SPM 3 pada kondisi muatan FSO *Light Load* di *Heading Angle* 0

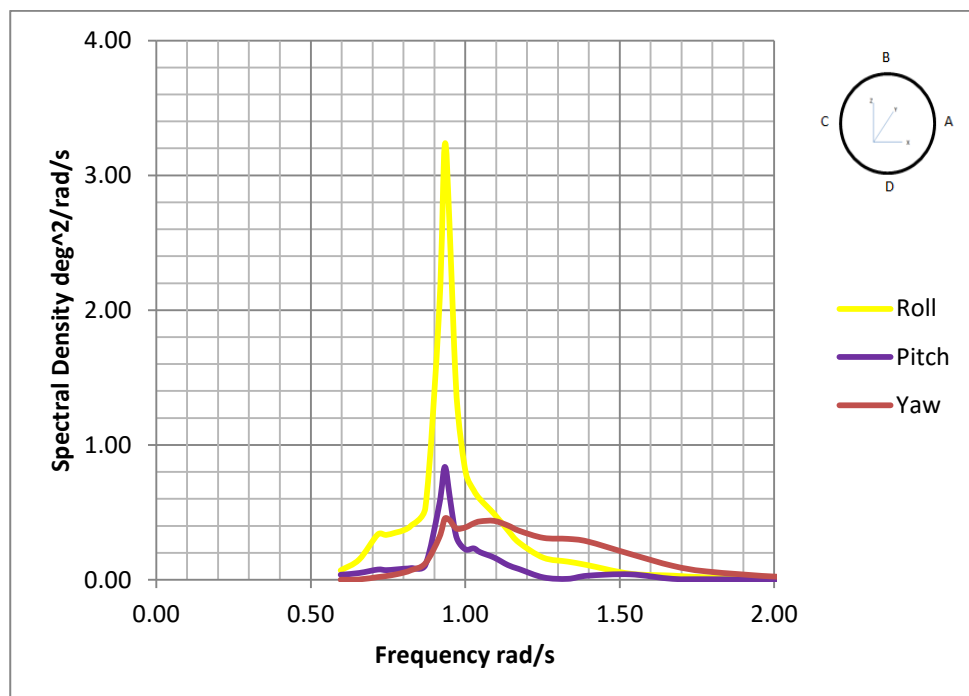


Gambar 4.48 Respon Spektra gerakan *rotasional* SPM 3 pada kondisi muatan FSO *Light Load* di *Heading Angle* 0

Dari **Gambar 4.47** dan **Gambar 4.48** yang telah ditampilkan dapat dilihat bahwa respon struktur SPM kondisi *light load* akibat beban operasi dan arah datang gelombang 0° memiliki nilai gerakan terbesar di *Surge* dan *Pitch*. Hal ini terjadi akibat pergerakan gelombang sejajar dengan arah pergerakan SPM.

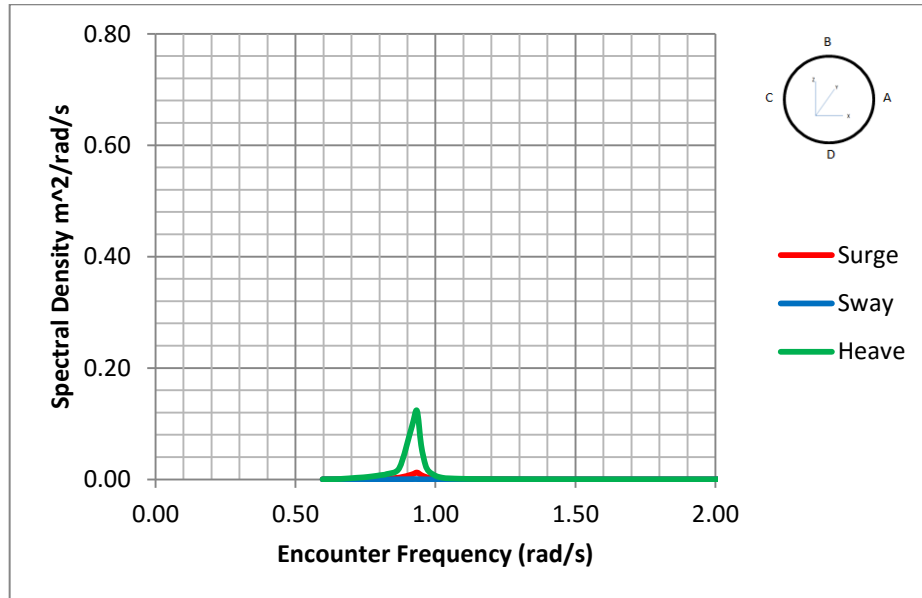


Gambar 4.49 Respon Spektra gerakan *translational* SPM 3 pada kondisi muatan FSO *Light Load* di *Heading Angle* 90

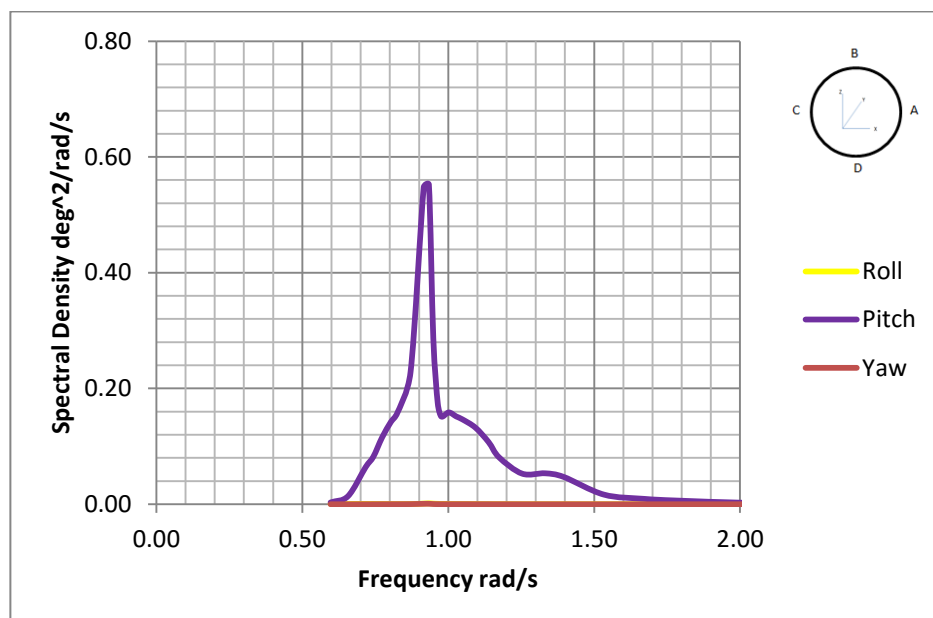


Gambar 4.50 Respon Spektra gerakan *rotasional* SPM 3 pada kondisi muatan FSO *Light Load* di *Heading Angle* 90

Dari **Gambar 4.49** dan **Gambar 4.50** yang telah ditampilkan dapat dilihat bahwa respon struktur SPM kondisi *light load* akibat beban operasi dan arah datang gelombang 90° memiliki nilai gerakan terbesar *Heave* untuk gerakan translasional dan *Roll* untuk gerakan rotasional. Hal ini terjadi akibat arah pergerakan gelombang tegak lurus dengan arah pergerakan SPM.



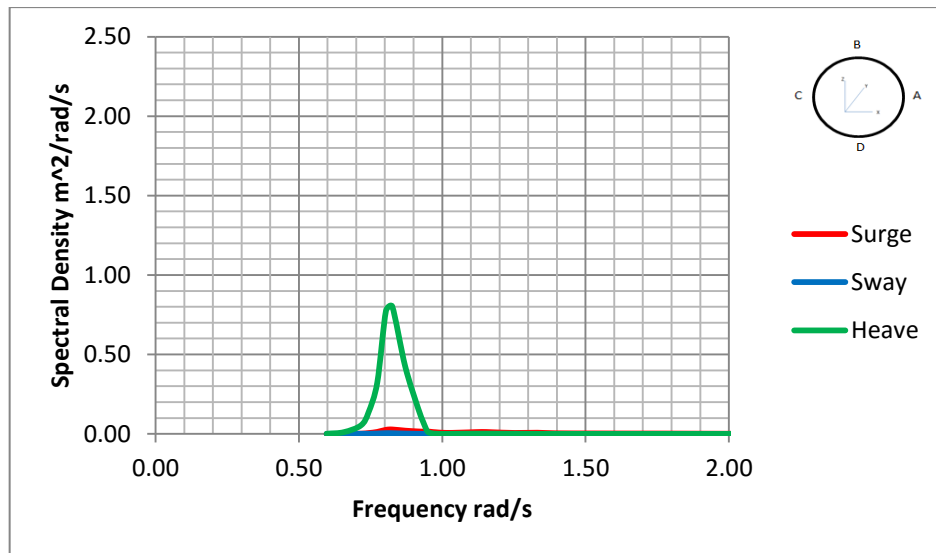
Gambar 4.51 Respon Spektra gerakan *translational* SPM 3 pada kondisi muatan FSO *Light Load* di *Heading Angle* 180



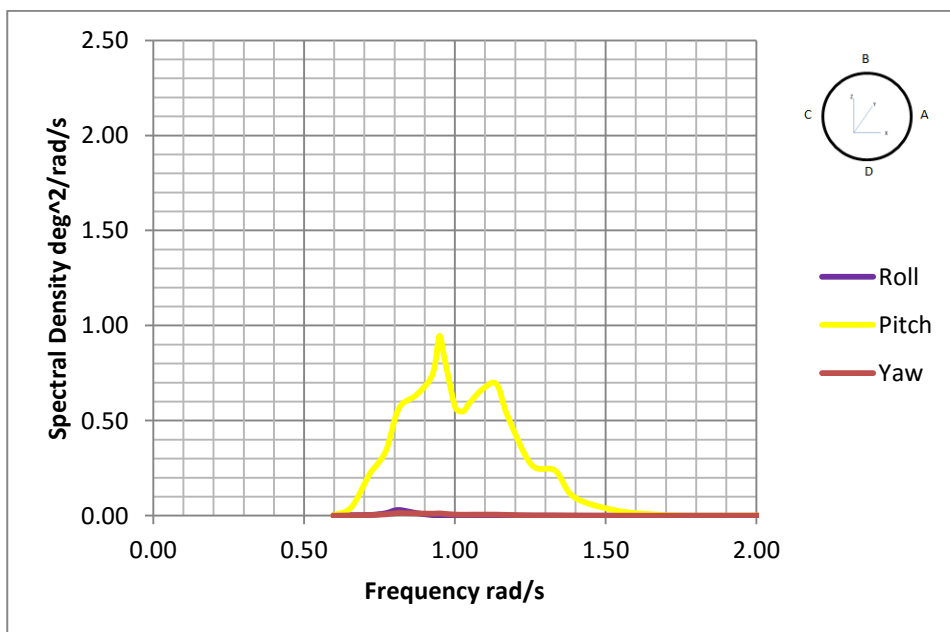
Gambar 4.52 Respon Spektra gerakan *rotasional* SPM 3 pada kondisi muatan FSO *Light Load* di *Heading Angle* 180

Dari **Gambar 4.51** dan **Gambar 4.52** yang telah ditampilkan dapat dilihat bahwa respon struktur SPM kondisi *light load* akibat beban operasi dan arah datang gelombang 180° memiliki nilai gerakan terbesar di *Heave* dan *Pitch*. Hal ini terjadi akibat pergerakan gelombang sejajar dengan arah pergerakan SPM.

4.8.2. Respon Spektra *Single Point Mooring 3* ketika muatan FSO *Full Load*

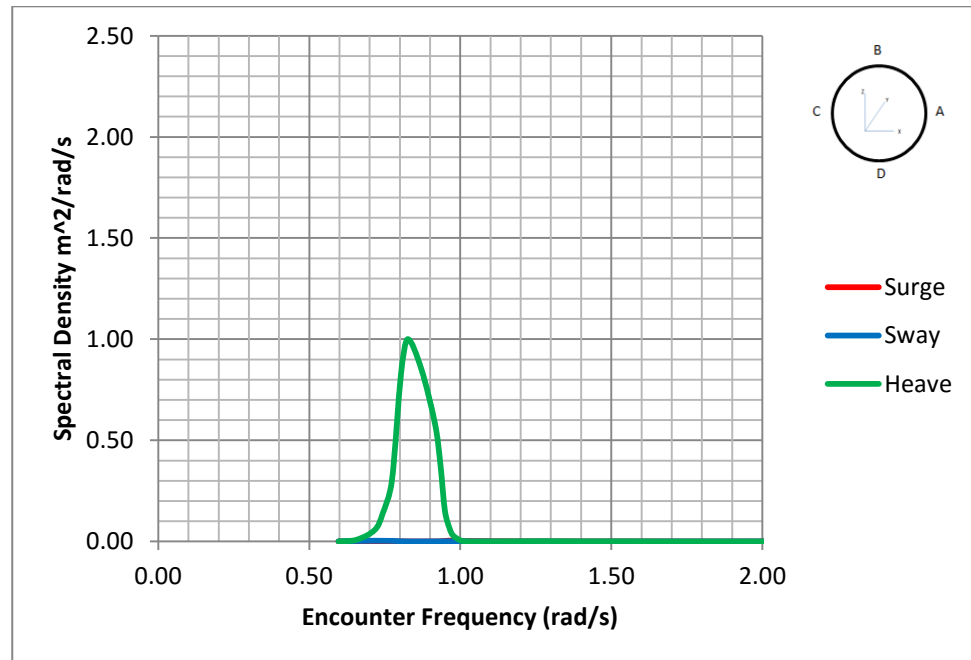


Gambar 4.53 Respon Spektra gerakan *translasional* SPM 3 pada kondisi muatan FSO *Full Load* di *Heading Angle 0*

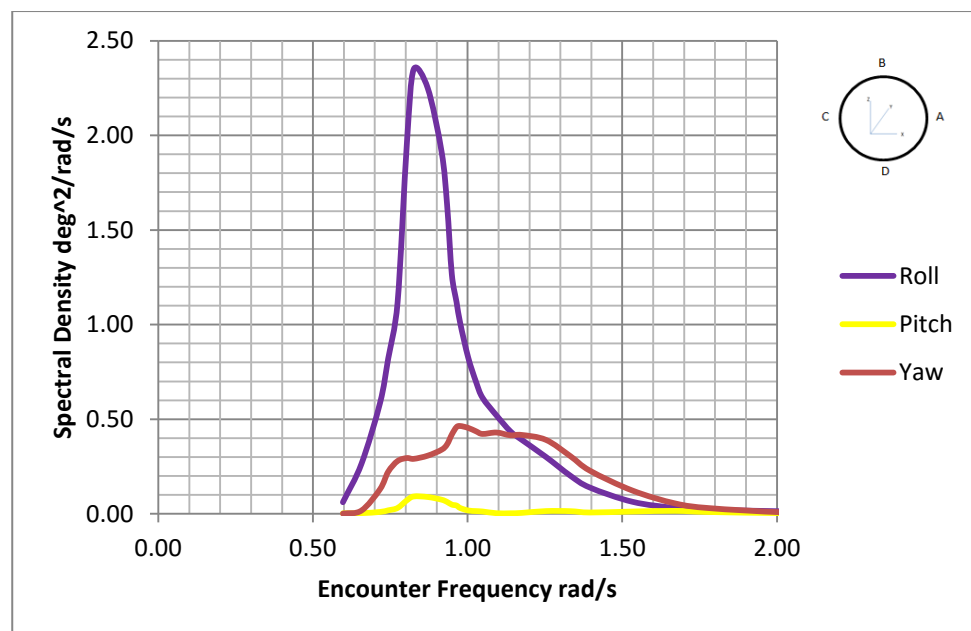


Gambar 4.54 Respon Spektra gerakan *rotasional* SPM 3 pada kondisi muatan FSO *Full Load* di *Heading Angle 0*

Dari **Gambar 4.53** dan **Gambar 4.54** yang telah ditampilkan dapat dilihat bahwa respon struktur SPM kondisi *full load* akibat beban operasi dan arah datang gelombang 0° memiliki nilai gerakan terbesar di *Heave* dan *Pitch*. Hal ini terjadi akibat pergerakan gelombang sejajar dengan arah pergerakan SPM.

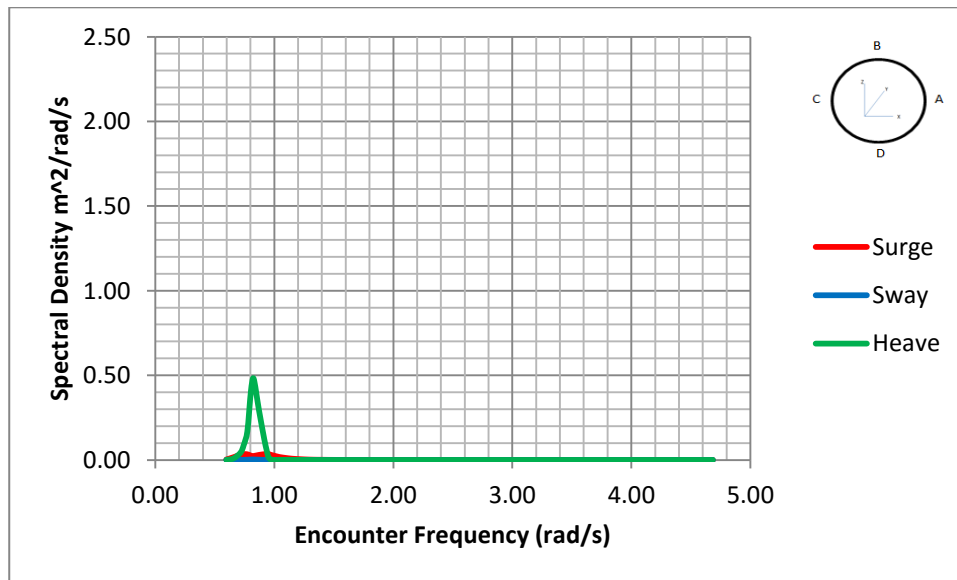


Gambar 4.55 Respon Spektra gerakan *translational* SPM 3 pada kondisi muatan FSO Full Load di Heading Angle 90

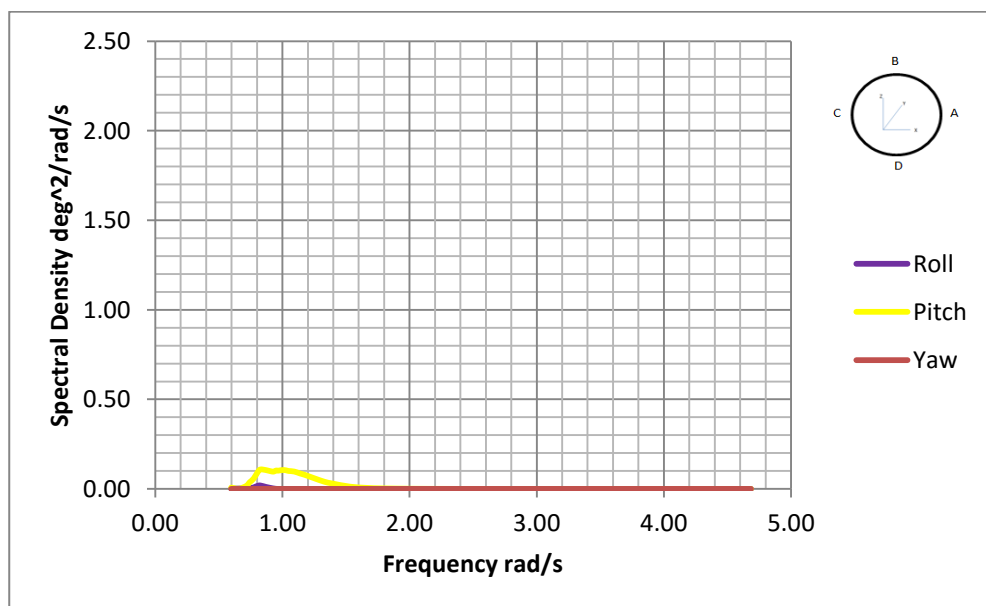


Gambar 4.56 Respon Spektra gerakan *rotasional* SPM 3 pada kondisi muatan FSO Full Load di Heading Angle 90

Dari **Gambar 4.55** dan **Gambar 4.56** yang telah ditampilkan dapat dilihat bahwa respon struktur SPM kondisi *full load* akibat beban operasi dan arah datang gelombang 90° memiliki nilai gerakan terbesar *Heave* untuk gerakan translasional dan *Roll* untuk gerakan rotasional. Hal ini terjadi akibat arah pergerakan gelombang tegak lurus dengan arah pergerakan SPM.



Gambar 4.57 Respon Spektra gerakan *translational* SPM 3 pada kondisi muatan FSO Full Load di Heading Angle 180



Gambar 4.58 Respon Spektra gerakan *rotasional* SPM 3 pada kondisi muatan FSO Full Load di Heading Angle 180

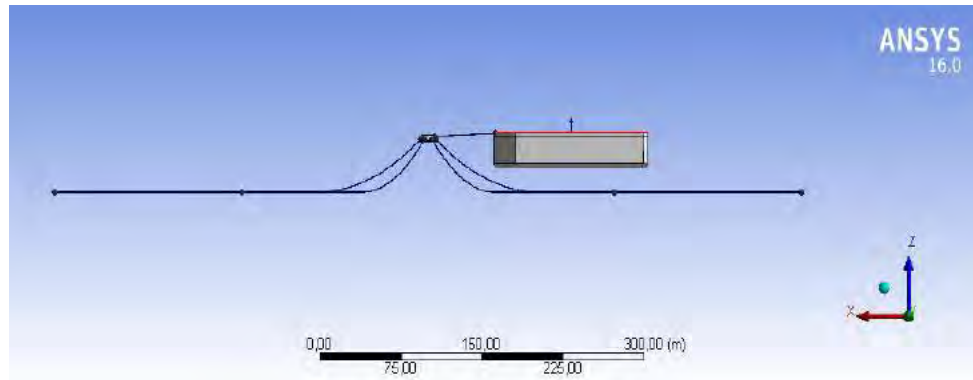
Dari kurva pada Gambar 4.47 sampai Gambar 4.58 yang telah ditampilkan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa respon spektra pada kondisi *light load* lebih besar daripada kondisi *full load*. Hal ini dikarenakan gerakan SPM saat kondisi FSO *full load* lebih stabil jika dibandingkan saat FSO kondisi kosong (*light load*), sehingga RAO pada kondisi *full load* dengan nilai yang lebih kecil menghasilkan respon struktur yang lebih kecil pula.

4.9. Analisis Tension pada Mooring Line

Analisis *tension* pada *anchor line* dan *hawser* pada struktur *Single Point Mooring* pada saat tertambat dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* dan *full load* dilakukan untuk mendapatkan tegangan terbesar pada *anchor legs* dan *hawser* sebagai *input* pada pemodelan selanjutnya. Analisis *tension* dilakukan dengan bantuan *software* ANSYS AQWA dengan simulasi *time domain analysis* pada kondisi *full load* dan *light load*. Untuk menghasilkan *tension* maksimum pada *line* diperlukan simulasi selama 3 jam (10800 s) sesuai anjuran dari DNV E301 (2004). Setelah didapatkan *tension* maksimum, perlu dilakukan cek safety factor . ABS menyatakan bahwa suatu mooring *line* dalam kasus ini adalah *anchor chain* dianggap memenuhi standar keamanan jika hasil perbandingan *Minimum Breaking Load* dengan *tension* yang didapatkan dari hasil simulasi tersebut harus lebih besar dari ketentuan ABS, yaitu 1,67 untuk *anchor legs* dan 1,82 untuk *hawser*. Skenario analisis ini dilakukan dalam 2 kondisi yaitu:

1. *Single Point Mooring* – FSO Arco Ardjuna kondisi *light load*
2. *Single Point Mooring* – FSO Arco Ardjuna kondisi *full load*

Untuk arah pembebanan gelombang terhadap *heading* struktur dilakukan dalam tujuh arah, yaitu 0, 90, dan 180. Gambar 4.59 berikut ini adalah hasil pemodelan pada *software* ANSYS Aqwa saat kondisi tertambat.



Gambar 4.59 Permodelan pada *software* Ansys Aqwa tampak samping

Sebelumnya perlu dihitung terlebih dahulu berapa nilai *tension* maksimum yang diijinkan oleh API RP 2SK 2nd edition. Perhitungannya adalah sebagai berikut:

□ **Untuk Hawser**

$$\text{Safety Factor} = \frac{\text{Minimum Breaking Load}}{\text{Maximum Tension}}$$

$$1.82 = \frac{4094000 \text{ N}}{\text{Maximum Tension}}$$

□ **Untuk Chain**

$$\text{Safety Factor} = \frac{\text{Minimum Breaking Load}}{\text{Maximum Tension}}$$

$$1.67 = \frac{7051000 \text{ N}}{\text{Maximum Tension}}$$

Setelah dilakukan simulasi dengan *software* ANSYS Aqwa selama 10800 detik (3jam) didapatkan *tension* pada *anchor legs* dan *hawser* maksimum dan minimum pada setiap sudut pembebanan seperti ditunjukkan pada Tabel 4.11 - Tabel 4.13 berikut

Tabel. 4.11 Analisis *tension* maksimum pada *mooring line* pada SPM saat tertambat dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* berdasarkan *time domain analysis*

Analisis Tension Maksimum Mooring Line kondisi FSO Muatan Light Load				
Time (s)	Heading	Line	Tension (kN)	SF
5304	0 Derajat	1	571,506	12,34
		2	445,357	15,83
		3	319,082	22,10
		4	325,465	21,66
		5	315,235	22,37
		6	454,117	15,53
5304	90 Derajat	1	418,761	16,84
		2	300,696	23,45
		3	299,475	23,54
		4	323,419	21,80
		5	523,388	13,47
		6	596,906	11,81
3489	180 Derajat	1	208,124	33,88
		2	229,336	30,75
		3	489,75	14,40
		4	515,16	13,69
		5	490,95	14,36
		6	229,177	30,77

Tabel. 4.12 Analisis *tension* maksimum pada *mooring line* pada SPM saat tertambat dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *full load* berdasarkan *time domain analysis*

Analisis Tension Maksimum Mooring Line kondisi FSO Muatan Full Load				
Time (s)	Heading	Line	Tension (kN)	SF
3732	0 Derajat	1	617,554	11,42
		2	501,663	14,06
		3	329,559	21,40
		4	229,952	30,66
		5	323,676	21,78
		6	507,878	13,88
9202,5	90 Derajat	1	293,306	24,04
		2	275,848	25,56
		3	276,943	25,46
		4	359,199	19,63
		5	593,909	11,87
		6	510,804	13,80
3498	180 Derajat	1	248,753	28,35
		2	270,639	26,05
		3	392,132	17,98
		4	435,562	16,19
		5	396,644	17,78
		6	271,219	26,00

Tabel 4.13 Hasil Analisis *Tension* Maksimum pada *Hawser* yang menghubungkan FSO Arco Ardjuna ke SPM 3 saat kondisi muatan FSO Arco Ardjuna *light load* dan *full load*

Konfigurasi	Light Load					
	0		90		180	
	Tension (kN)	Check	Tension (kN)	Check	Tension (kN)	Check
Hawser 1	989,119	4,14	909,69	4,5	810,056	5,05
Hawser 2	997,068	4,11	923,45	4,43	815,481	5,02
Konfigurasi	Full Load					
	0		90		180	
	Tension (kN)	Check	Tension (kN)	Check	Tension (kN)	Check
Hawser 1	763,59	5,36	697,759	5,87	614,212	6,67
Hawser 2	766,619	5,34	703,271	5,82	617,416	6,63

Anchor line yang menerima *tension* maksimum memiliki *safety factor* minimal. Besar *tension* yang didapatkan pada analisis ini akan dicocokkan atau dikoreksi dengan suatu kriteria *safety factor* berdasarkan API RP 2SK 2nd edition.

Perlu diketahui bersama bahwa semakin besar nilai *tension* yang terjadi dibandingkan dengan nilai batas kapasitas tegangan (breaking strength) tali tambat yang diterima, maka akan semakin rentan tali tersebut untuk putus. Oleh sebab itu sebelum menganalisis *tension* pada tali tambat terlebih dahulu dilakukan perhitungan secara mendetail tentang desain panjang tali tambat.

Berdasarkan tabel diatas untuk semua kondisi pembebanan, tegangan yang terjadi pada rantai jangkar masih memenuhi standar keamanan yang disyaratkan oleh ABS. Hasil tegangan pada kondisi *light load* lebih besar dibandingkan dengan saat kondisi *full load*. Hal ini menunjukkan bahwa *anchor legs* dan *hawser* aman untuk beroperasi. *Tension anchor line* (berdasarkan Ansys Aqwa) yang paling besar terjadi ketika arah pembebanan 0° untuk *line 1*, dalam kondisi muatan *full load* dan arah 90° untuk *line 6*, ketika kondisi muatan *light load*. *Line 1* mempunyai tegangan terbesar sebesar 617,554 kN dalam kondisi *full load*. Tegangan tersebut terjadi ketika simulasi detik ke-3372. Nilai *tension* maksimum ini (berdasarkan Orcaflex dalam lampiran) nantinya akan digunakan untuk pembebanan pada pemodelan ANSYS Mechanical.

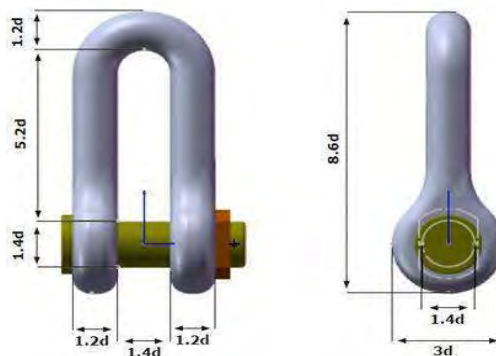
4.10. Pemodelan Struktur *Anchor Chain*

Sebelum dilakukan analisa tegangan dan umur kelelahan struktur *Anchor Chain*, terlebih dahulu membuat model pada Autocad 3D yang nantinya sebagai *geometry input* pada ANSYS Mechanical. Model yang dibuat merupakan model konstruksi lokal. Pemodelan pada ANSYS Mechanical dibuat berdasarkan dimensi yang didapatkan dari data ukuran asli *Calm Buoy Anchoring System general arrangement* milik PT. Pertamina Hulu Energi *Offshore North West Java* (ONWJ) seperti Tabel 4.14.

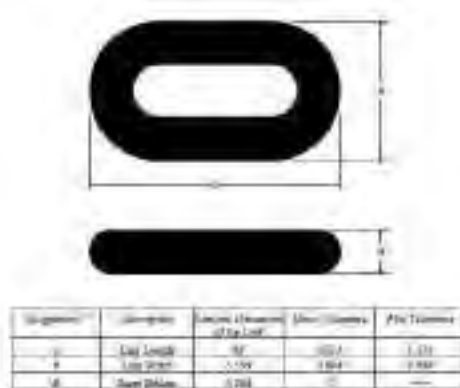
Tabel 4.14 Data Chain diameter

<i>Designation</i>	<i>Data</i>
<i>Number of Legs</i>	6
<i>Paid Out Lenght</i>	350
<i>Number of Segment</i>	1
<i>Chain Diameter</i>	102 mm
<i>Chain Type</i>	R3
<i>MBL</i>	7051 kN
<i>Stiffness</i>	868 MN

Data diameter tersebut digunakan untuk melakukan permodelan berdasarkan kriteria perancangan yang tercantum pada *ABS Certification of Mooring Chain*. Pemilihan dimensi, bentuk dan proporsi dari rantai dan aksesoris harus sesuai dengan standart yang ada didalam regulasi, seperti ISO 1704.



Gambar 4.60 Kriteria perancangan *Joining Shackles* berdasarkan ABS



Gambar 4.61 Kriteria perancangan *Studless Link* berdasarkan *ABS Certification of Mooring Chain*

Jenis material konstruksi menggunakan baja yang diproduksi dengan basic oksigen, sesuai dengan aturan ASTM E112 dengan *yield strength*

sebesar 250 Mpa. Data foto struktur *Single Point Mooring* dan hasil pemodelan global dapat dilihat pada Gambar 4.62 sampai Gambar 4.64 berikut.



Gambar 4.62 Permodelan 3D Struktur lokal *Anchor Chain* tampak atas



Gambar 4.63 Permodelan 3D Struktur lokal *Anchor Chain* tampak samping



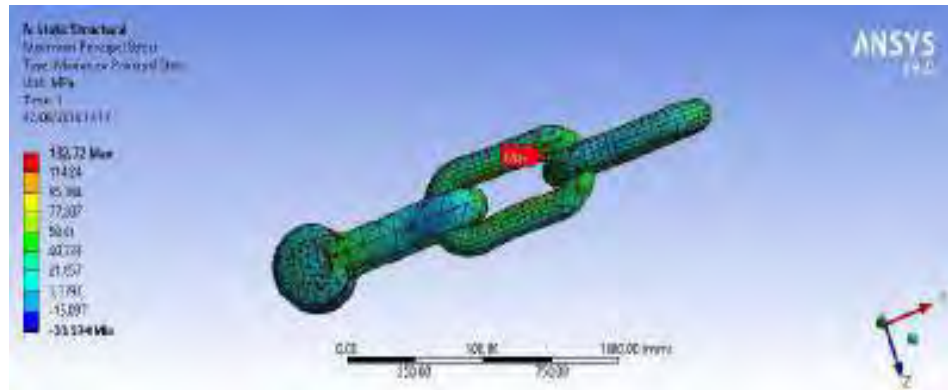
Gambar 4.64 Hasil Permodelan *Anchor Chain* pada *Ansys Mechanical*

Chain yang digunakan merupakan *chain* dengan tipe *Studless Link*, grades R3 dengan *Minimum Breaking Load* (MBL) 7051 kN setelah mengalami korosi. Dengan diameter 102 mm berdasarkan data perusahaan. Pada ABS dijelaskan bahwa, dalam 15 phatom konfigurasi anchor chain memiliki panjang 27.5 m, dimana penulis memodelkan *anchor chain* melalui software *Ansys Mechanical* hanya 4 meter dari 350 m ukuran panjang keseluruhan.

4.10.1. Analisis perbandingan ukuran *chain*

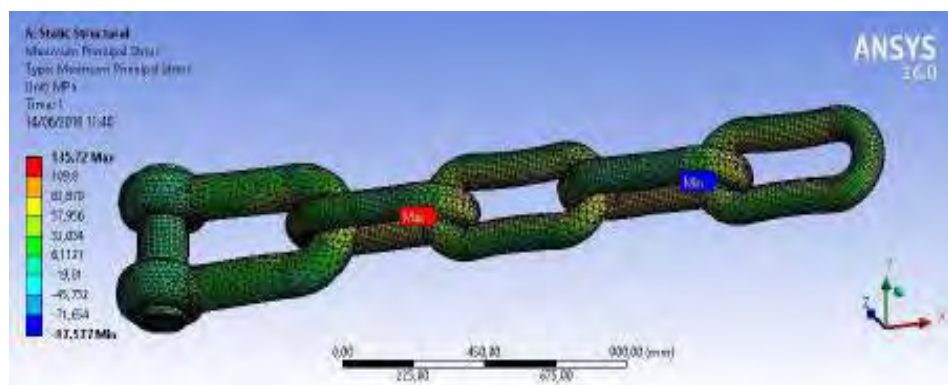
Penulis memodelkan *chain* menjadi 3 model, dengan 2 mata rantai, 4 mata rantai dan 8 mata rantai, dengan masing-masing model memiliki satu *shackle*. Lalu menginputkan besar nilai *tension* secara konstan kepada masing-masing

model untuk menganalisis perbandingan besar tegangan yang terjadi pada masing-masing model *anchor chain* yang telah dibuat dengan melakukan *meshing* terlebih dahulu. Tampak seperti Gambar 4.65 – Gambar 4.67 dibawah ini.



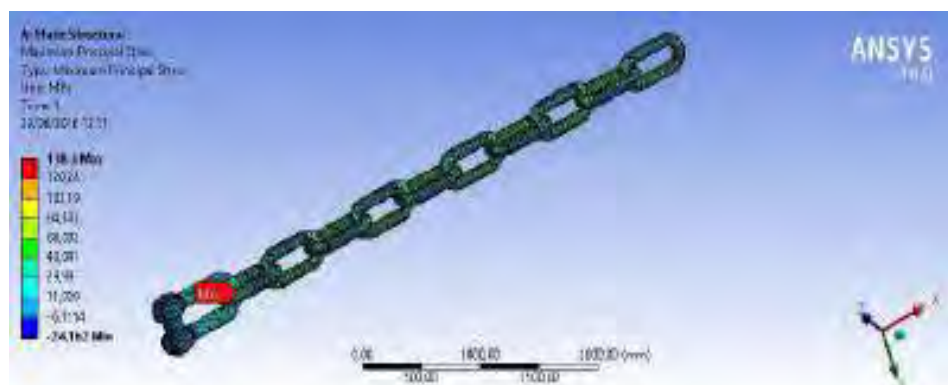
Gambar 4.65 Permodelan lokal *chain* dengan satu *shackle* dan dua mata rantai

Permodelan dengan satu *shackle* dan dua mata rantai, didapatkan besar tegangan adalah 132,72 Mpa.



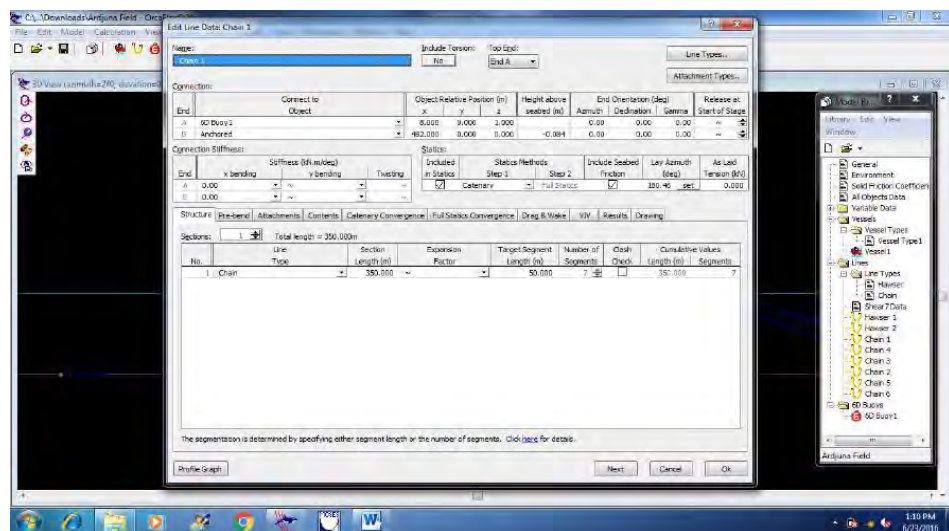
Gambar 4.66 Permodelan lokal *chain* dengan satu *shackle* dan empat mata rantai

Permodelan dengan satu *shackle* dan empat mata rantai, didapatkan besar tegangan adalah 135,72 Mpa.



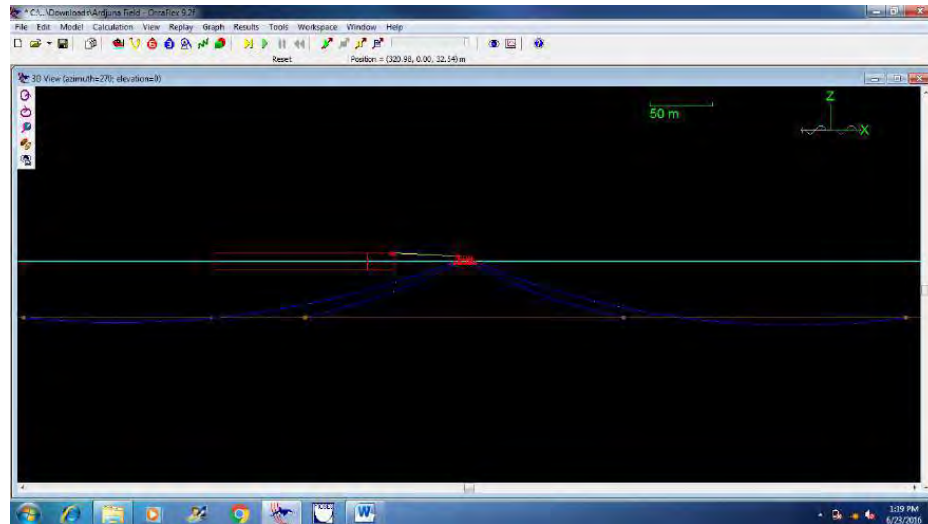
Gambar 4.67 Permodelan lokal *chain* dengan satu *shackle* dan delapan mata rantai

Permodelan dengan satu *shackle* dan delapan mata rantai menunjukkan besar tegangan maksimum yang diterima adalah 138,3 Mpa. Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan walaupun perubahan besar tegangan yang terjadi tidak besar, namun model dengan empat mata *chain* tidak mampu mewakili keseluruhan *chain* dengan baik, namun karena keterbatasan aplikasi permodelan yang dimiliki penulis, penulis tetap menggunakan software Ansys Mechanical untuk permodelan lokal. Dengan mencari beban *tension* yang diterima permodelan global *mooring line* menggunakan software Orcaflex sekaligus untuk mengetahui letak tegangan terbesar pada *chain* dengan memodelkan seluruh *chain* sepanjang 350 meter dengan membagi *segment* menjadi tujuh, dan masing-masing panjang *segment* adalah 50 meter seperti Gambar 4.68 dibawah ini.



Gambar 4.68 Pengaturan jumlah *segment* pada Orcaflex

Dari permodelan dan pengaturan konfigurasi tersebut akan didapatkan hasil permodelan global pada software Orcaflex seperti pada Gambar 4.69 , dimana sistem *mooring line* sudah diatur menjadi tujuh *segment* untuk masing-masing *anchor line*.

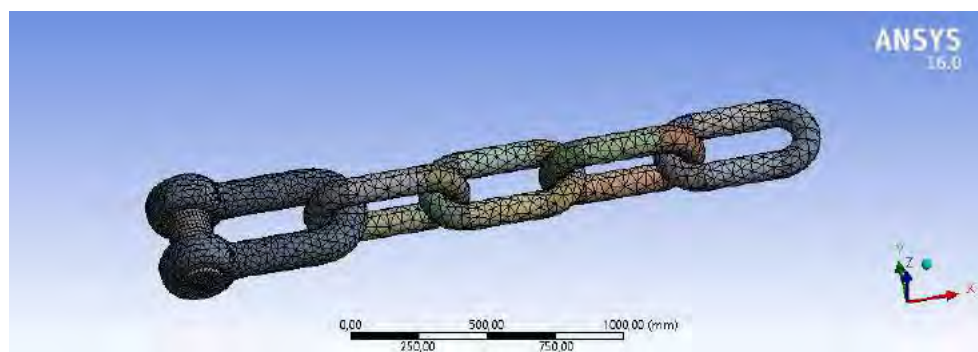


Gambar 4.69 Permodelan konfigurasi sistem tambat pada Orcaflex

Setelah pembuatan pemodelan struktur *Anchor Chain* dengan menggunakan ANSYS Mechanical, dan permodelan global *mooring line* pada Orcaflex, langkah selanjutnya adalah pemberian beban. Hasil *stress* yang didapatkan dari *software* ini nantinya akan dianalisis tegangan ijinnya berdasarkan *American Bureau Shipping*.

4.11. *Sensitivity Meshing Analysis*

Sensitivity analysis perlu dilakukan untuk memastikan bahwa tegangan yg terjadi pada hasil luaran analisis telah benar dan mendekati nilai kebenaran. Dalam tugas akhir ini, uji sensitivitas dilakukan melalui variasi kerapatan dalam *meshing*. Berdasarkan variasi kerapatan *meshing* yang telah diuji, maka didapatkan hasil *maximum principal stress*. Dari beberapa hasil tegangan yang dihasilkan dianalisis dan didapatkan perbedaan hasil kurang dari 5%. Pada tugas akhir ini dilakukan *running* dengan kondisi kerapatan *meshing* seperti pada Gambar 4.70

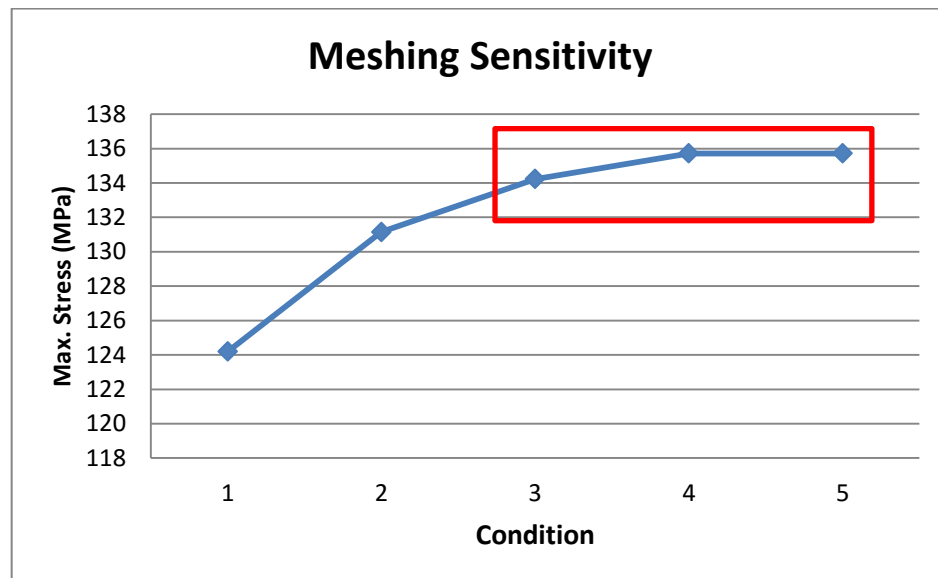


Gambar 4.70 *Meshing* Struktur *Anchor Chain*

Berdasarkan variasi *meshing* yang dilakukan, didapatkan tabulasi *meshing* dan *maximum principal stress* yang dihasilkan pada Tabel 4.15 dan Gambar 4.71 sebagai berikut:

Tabel 4.15 Tabulasi hasil *Maximum Principal Stress* untuk variasi kerapatan *meshing*

Condition	Mesh Sizing (mm)	Max. Stress (Mpa)	Error
1	50	124.19	
2	40	131.15	0.06
3	30	134.23	0.02
4	20	135.72	0.01
5	12	135.72	0



Gambar 4.71 Sensitivitas *meshing* model struktur SPM

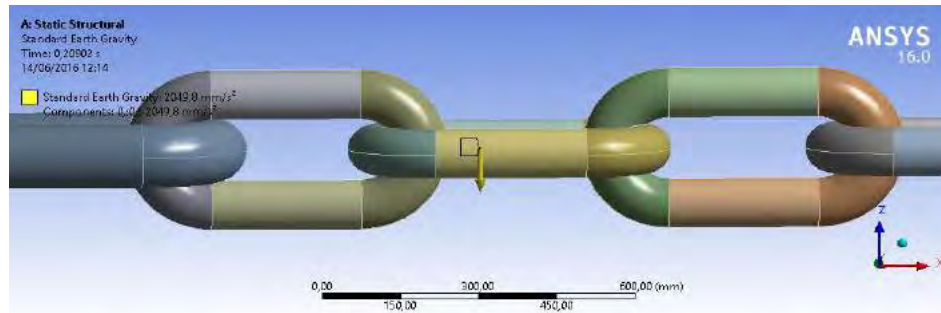
Berdasarkan Tabel dan grafik pada Gambar dapat disimpulkan bahwa struktur *Single Point Mooring* dapat dengan baik dimodelkan pada ukuran $\leq \text{mesh } 30 \text{ mm}$, karena nilai keluaran stress tidak mengalami perubahan (konstan).

4.12. Pembebanan pada ANSYS Mechanical

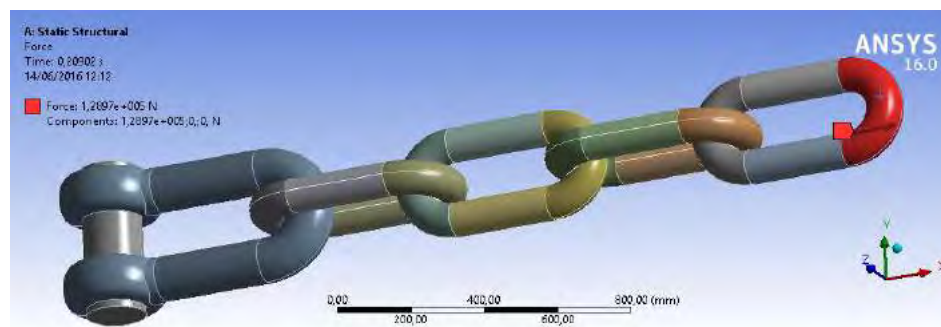
Dalam analisis kelelahan pada struktur *Anchor chain*, diperlukan beberapa konfigurasi pembebanan *tension* yang telah didapat sebelumnya. Pembebanan arah heading angle Selain beban *tension*

Pemilihan *heading* yang digunakan penulis berdasarkan pada jumlah kejadian gelombang yang didapatkan dari data perusahaan serta mengacu pada Bhattacharyya, sehingga kombinasi pembebanan yang terjadi adalah seperti pada Tabel 4.16 berikut :

Pembebanan	Keterangan		
LC 1	<i>Maximum Tension</i>	<i>FSO Light Load</i>	<i>Heading 0</i>
LC 2	<i>Maximum Tension</i>	<i>FSO Light Load</i>	<i>Heading 90</i>
LC 3	<i>Maximum Tension</i>	<i>FSO Light Load</i>	<i>Heading 180</i>
LC 4	<i>Maximum Tension</i>	<i>FSO Full Load</i>	<i>Heading 0</i>
LC 5	<i>Maximum Tension</i>	<i>FSO Full Load</i>	<i>Heading 90</i>
LC 6	<i>Maximum Tension</i>	<i>FSO Full Load</i>	<i>Heading 180</i>
LC 7	<i>Minimum Tension</i>	<i>FSO Light Load</i>	<i>Heading 0</i>
LC 8	<i>Minimum Tension</i>	<i>FSO Light Load</i>	<i>Heading 90</i>
LC 9	<i>Minimum Tension</i>	<i>FSO Light Load</i>	<i>Heading 180</i>
LC 10	<i>Minimum Tension</i>	<i>FSO Full Load</i>	<i>Heading 0</i>
LC 11	<i>Minimum Tension</i>	<i>FSO Full Load</i>	<i>Heading 90</i>
LC 12	<i>Minimum Tension</i>	<i>FSO Full Load</i>	<i>Heading 180</i>

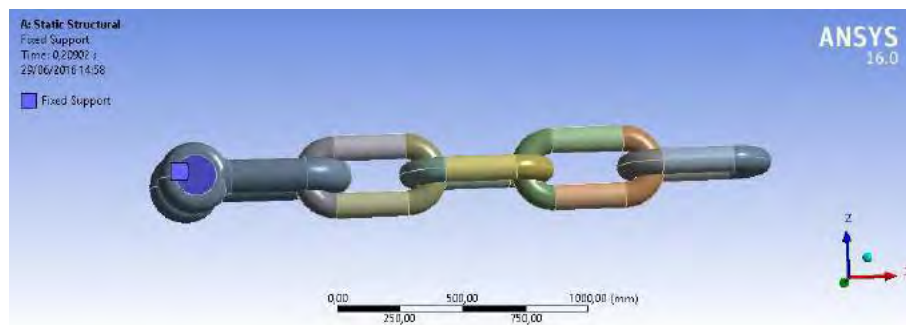


Gambar 4.73 Beban berat Struktur



Gambar 4.74 Beban tension

Tension *Anchor legs* yang diperoleh dari analisis global sistem tambat FSO Arco Ardjuna pada SPM 3 berdasarkan pada heading pembebanan 0° , 90° dan 180° dan menjadi beban yang digunakan untuk input pada analisis tegangan struktur *Anchor Chain*. Seperti contoh inputan beban tension pada Gambar 4.74



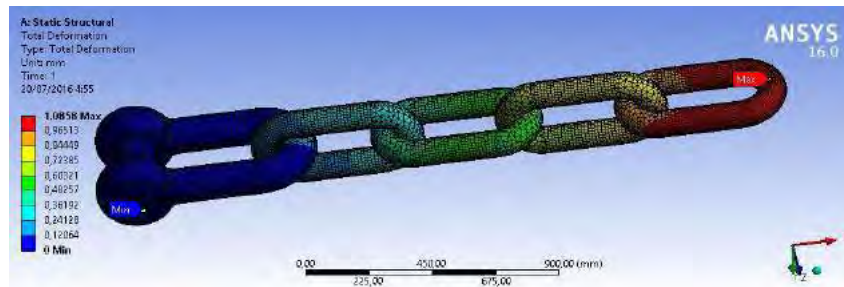
Gambar 4.75 Fixed Support

Selain itu, penempatan kondisi batas sebagai *support* struktur lokal yang akan dianalisis digunakan *fixed support* pada bagian *Shackle Lock* yang merupakan bagian dari konfigurasi *Anchor Chain*.

4.13. Analisis Tegangan pada Struktur *Anchor Chain*

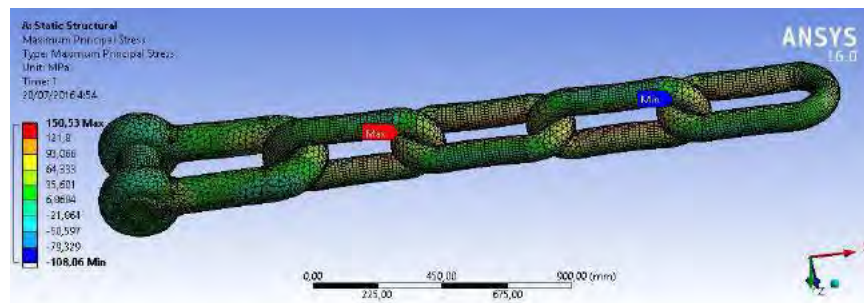
Analisis tegangan pada struktur *anchor chain* digunakan untuk

mendapatkan besar tegangan maksimum dan minimum yang diterima oleh *Anchor Chain* yang akan digunakan sebagai bahan perhitungan *stress range* untuk mendapatkan akumulasi kerusakan pada model *anchor chain*.



Gambar 4.76 Deformasi pada *Anchor Chain*

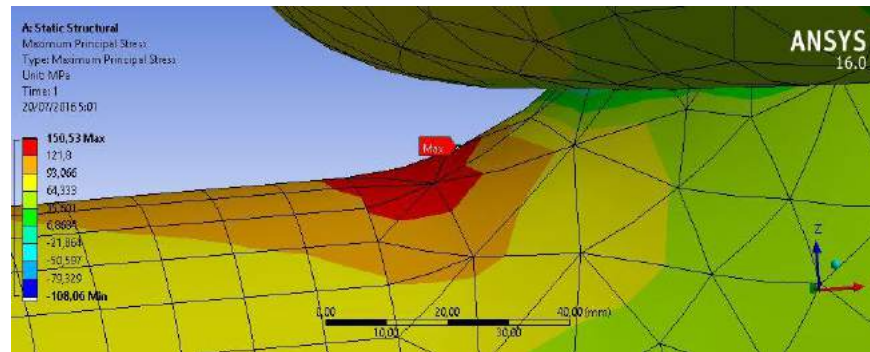
Ketika model lokal *anchor chain* diberi beban *tension*, struktur akan mengalami deformasi berdasarkan besar beban yang diterima. Semakin besar beban yang diberikan pada struktur, semakin besar pula deformasi dan *stress* yang terjadi pada struktur.



Gambar 4.77 *Maximum Principal Stress* pada *Anchor Chain*

Berdasarkan hasil pemodelan struktur lokal *Anchor Chain*, terlihat pada Gambar 4.76 dan Gambar 4.77 dengan pembebanan sesuai *tension anchor legs* dan beban berat struktur, didapatkan tegangan maksimum sebesar 150,53 MPa dengan deformasi 1,0858 mm. Nilai tegangan maksimum tersebut masih lebih kecil jika dibandingkan dengan tegangan ijin yang dianjurkan oleh ABS "*Safehull-Dynamic Loading Approach for FPSO Systems*" sebesar 225 MPa. Dan Nilai deformasi yang dihasilkan juga masih lebih kecil jika dibandingkan dengan syarat deformasi maksimum yang tercantum dalam ABS "*Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull*

Structures during Construction” yaitu 11.2 mm. Letak tegangan terbesar hasil luaran analisis dapat dilihat pada Gambar 4.78 berikut :



Gambar 4.78 Letak tegangan terbesar pada *anchor chain*

4.14. Analisis Umur Kelelahan pada struktur *Anchor Chain*

Perhitungan umur kelelahan dalam tugas akhir ini menggunakan metode *S-N Curve* berdasarkan hukum kegagalan *palmgren miner (miner’s rule)* dengan mengestimasi kumulatif kegagalan *fatigue (cumulative fatigue damage)* menggunakan metode *simplified fatigue analysis*. Berikut ini adalah contoh tabulasi *maximum principal stress* yang terjadi pada *Anchor Chain* yang nantinya digunakan dalam perhitungan umur kelelahan.



Gambar 4.78 Contoh pembagian segmen permodelan *Anchor Chain*

Penulis membagi satu *mooring line* menjadi tujuh segment dengan masing – masing panjang segment 50 meter. Berdasarkan hasil outputan *software* Orcaflex (LAMPIRAN B) didapatkan *tension* maksimum dan minimum yang terjadi pada masing-masing segment *anchor chain*. Tension tersebut digunakan untuk menghitung besar *stress range* sebagai bahan perhitungan akumulasi kegagalan struktur seperti contoh perhitungan pada Tabel 4.17 dan Gambar 4.79

Tabel 4.17 Perhitungan Stress Range

Chain 1		
Max Principal Stress (LC 1 - LC 6)	Max Principal Stress (LC 7 - LC 12)	Stress Range
150.55	-108.07	258.62
146.77	9.51	137.26
143.66	6.00	137.66
141.15	3.42	137.73
139.48	2.10	137.38
138.79	2.66	136.13

Perhitungan *Stress range* didapat dengan mencari rentang antara nilai maksimum *principal stress* dari *tension* maksimum dikurangi dengan nilai maksimum *principal stress* dari *tension* minimum. Dari contoh tabulasi perhitungan tersebut, didapatkan nilai *stress range* untuk segment 1 pada Chain 1 yaitu 258.62 Mpa. Nilai tersebut menjadi bahan inputan untuk perhitungan akumulasi kegagalan berdasarkan hukum Palmgren Miner. Seperti perhitungan dibawah ini :

Gambar 4.79 Perhitungan akumulasi kegagalan

LC -1		
S_{R1}	=	258.62
Stress Range		
S_{R1}	=	258.62 N/mm ²
N_R	=	1.00E+04 cycles
α_s	=	1
f_0	=	1 operation factor
U	=	30 year
	=	9.46E+08 second
L	=	350 m
	=	$f_0 U$
	=	$4 \log L$
N_L	=	9.30E+07
SN-curve parameters		
m	=	3
Δm	=	2
K_2	=	1.04E+12
S_q	=	53.4 N/mm ²
Weibull parameter		
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L - 100}{300}$
α	=	0.8
ζ	=	0.88366259
v_1	=	$\left(\frac{S_{R1}}{S_q} \right)^{\frac{m}{\alpha}} \ln N_R$ = 0.10
$1 + \frac{m}{\zeta}$	=	4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\zeta}$	=	6.66
$\Gamma \left(1 + \frac{m}{\zeta} \right)$	=	10.07
$\gamma \left(1 + \frac{m}{\zeta} \right)$	=	$\frac{\gamma \Gamma \left(1 + \frac{m}{\zeta} \right)}{\Gamma \left(1 + \frac{m}{\zeta} \right)} \cdot v_1$ = 7.74E-06
$\gamma \left(1 + \frac{m + \Delta m}{\zeta} \right)$	=	$\frac{\gamma \Gamma \left(1 + \frac{m + \Delta m}{\zeta} \right)}{\Gamma \left(1 + \frac{m + \Delta m}{\zeta} \right)} \cdot v_1$ = 6.35E-12
$v_1 - \Delta m / \zeta$	=	191.99089
μ_1	=	$1 - \frac{\left\{ \gamma \left(1 + \frac{m}{\zeta} \right) \cdot v_1 \right\} - v_1^{-m/\alpha} \gamma \left(1 + \frac{m + \Delta m}{\zeta} \right)}{\Gamma \left(1 + \frac{m}{\zeta} \right)}$
	=	0.99999923
Fatigue damage		
DM_i	=	$\sum_{i=1}^{N_R} \frac{\alpha_s N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\zeta}} \mu_1 \Gamma \left(1 + \frac{m}{\zeta} \right)$
DM	=	8.23E-01

Dari perhitungan akumulasi kegagalan tersebut, nilai DM diinputkan

pada perhitungan *fatigue life* untuk mendapatkan besar umur kelelahan struktur yaitu :

$$fatigue\ life = \frac{design\ life}{D}$$

Dari pembebanan yang telah diberikan, didapatkan hasil akumulasi kegagalan yang digunakan untuk menentukan umur struktur *Anchor Chain* seperti Tabel 4.18 dibawah ini :

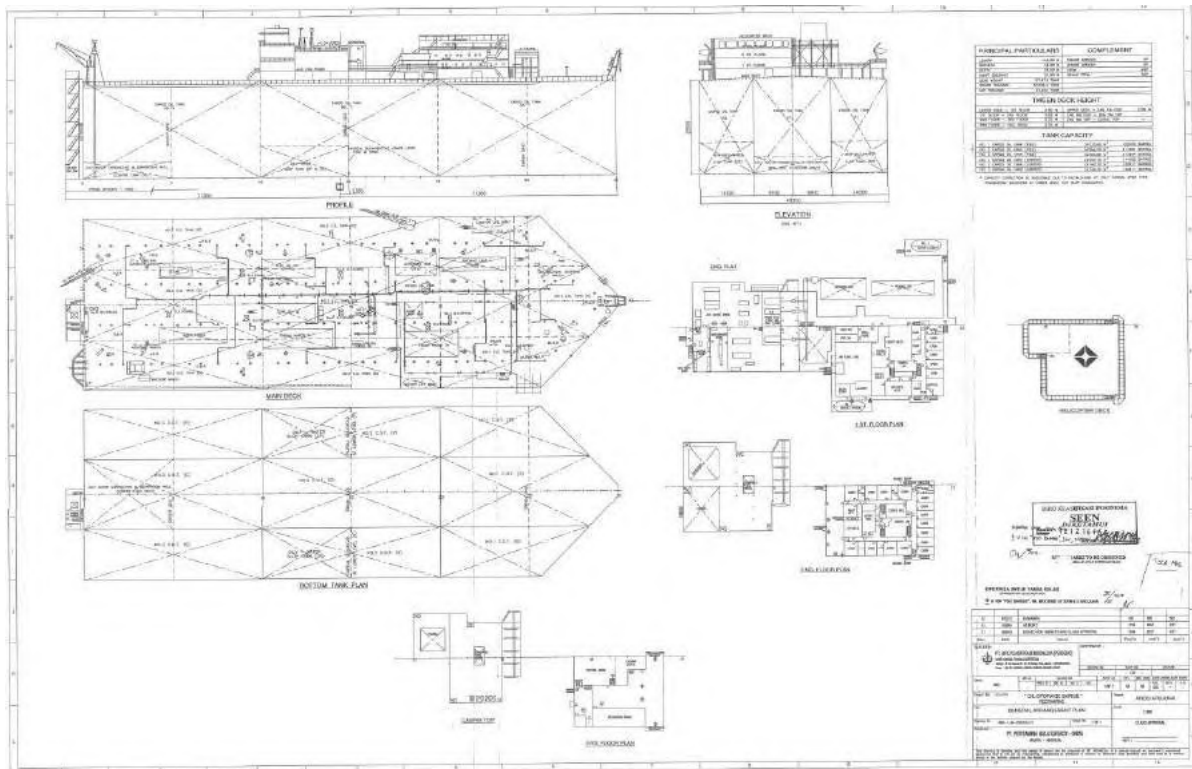
Tabel 4.18 Umur Kelelahan *Anchor Chain* kondisi beban siklis

<i>Load Condition</i>	<i>Operation factor</i>	<i>Fatigue Life</i>					
		<i>Chain 1</i>	<i>Chain 2</i>	<i>Chain 3</i>	<i>Chain 4</i>	<i>Chain 5</i>	<i>Chain 6</i>
LC 1 - LC 7	0.225	8.23E-01	1.23E-01	5.74E-02	1.07E-01	6.59E-02	5.39E-02
LC 2 - LC 8	0.215	1.23E-01	1.23E-01	1.15E-01	1.67E-01	1.09E-01	1.00E-01
LC 3 - LC 9	0.213	1.24E-01	1.24E-01	1.14E-01	1.61E-01	1.08E-01	1.01E-01
LC 4 - LC 10	0.225	1.24E-01	1.24E-01	1.06E-01	1.61E-01	1.07E-01	9.96E-02
LC 5 - LC 11	0.215	1.23E-01	1.23E-01	1.08E-01	1.62E-01	1.10E-01	9.85E-02
LC 6 - LC 12	0.213	1.20E-01	1.20E-01	1.09E-01	1.03E-01	1.06E-01	1.01E-01
<i>Total Damage Ratio</i>		3.18E-01	1.61E-01	1.32E-01	1.88E-01	1.31E-01	1.20E-01
<i>Fatigue Life (years)</i>		94.25681273	186.6708791	227.110355	159.8733114	228.2050238	249.727087

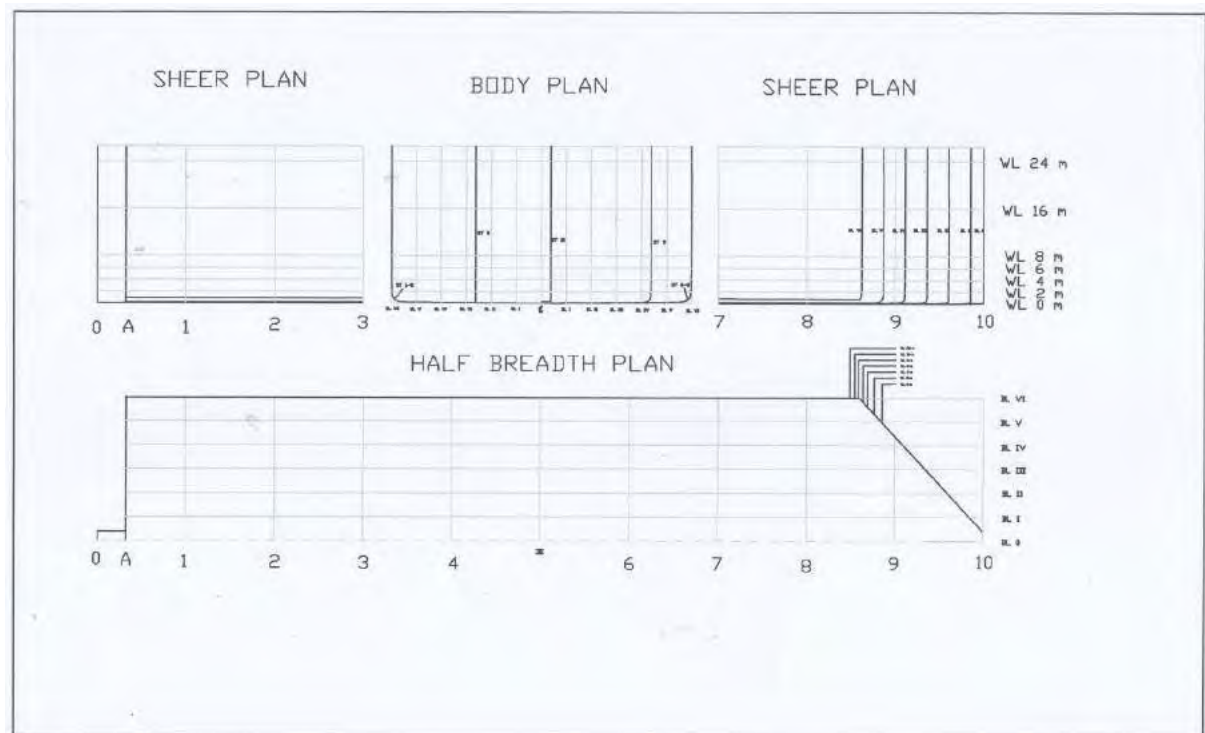
Dari hasil perhitungan umur kelelahan struktur, pada Tabel 4.18 diperoleh hasil bahwa struktur *Anchor Chain* memiliki harga $D < 1$ sehingga struktur tersebut dapat dikatakan masih aman untuk digunakan dalam kondisi operasi dengan umur kelelahan struktur 94 tahun.

LAMPIRAN A
Data Struktur dan *Drawing*

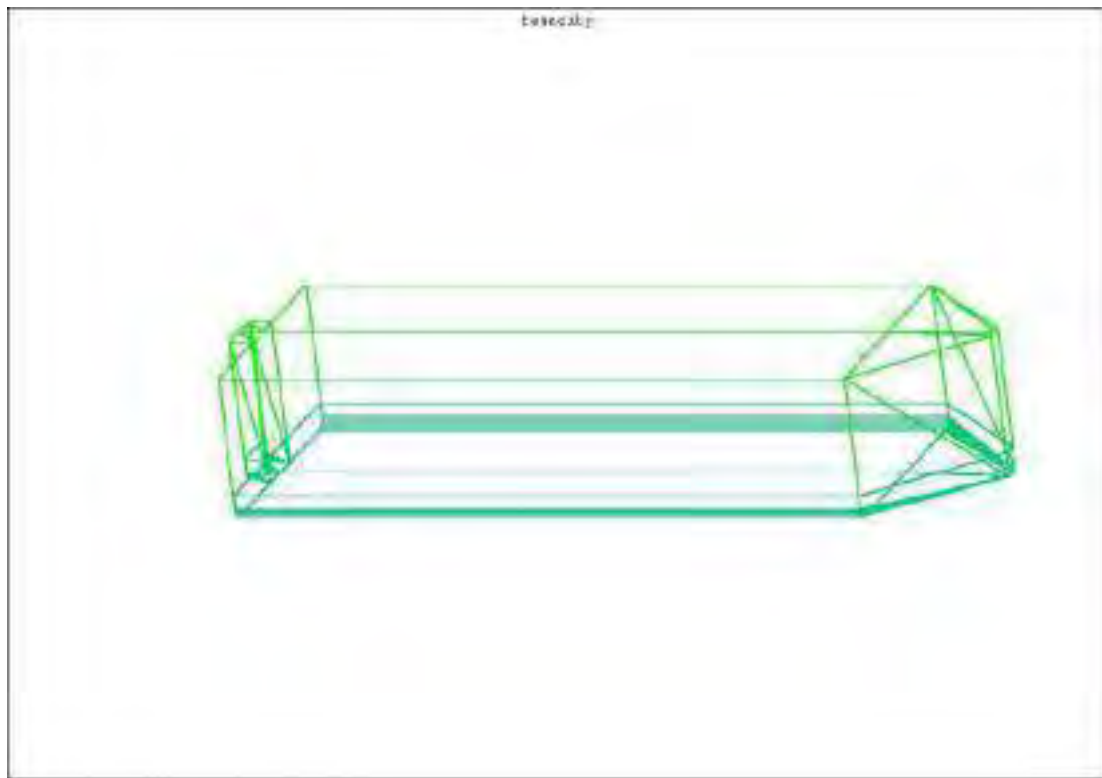
• **GENERAL ARRANGEMENT FSO ARCO ARDJUNA**



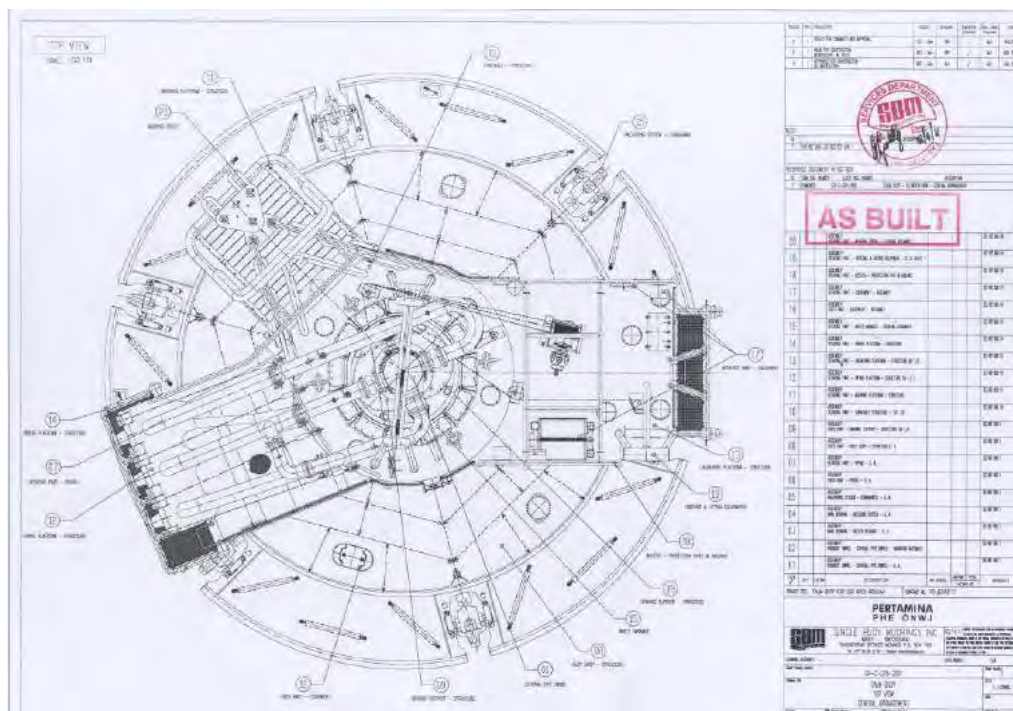
- *FSO ARCO ARDJUNA*



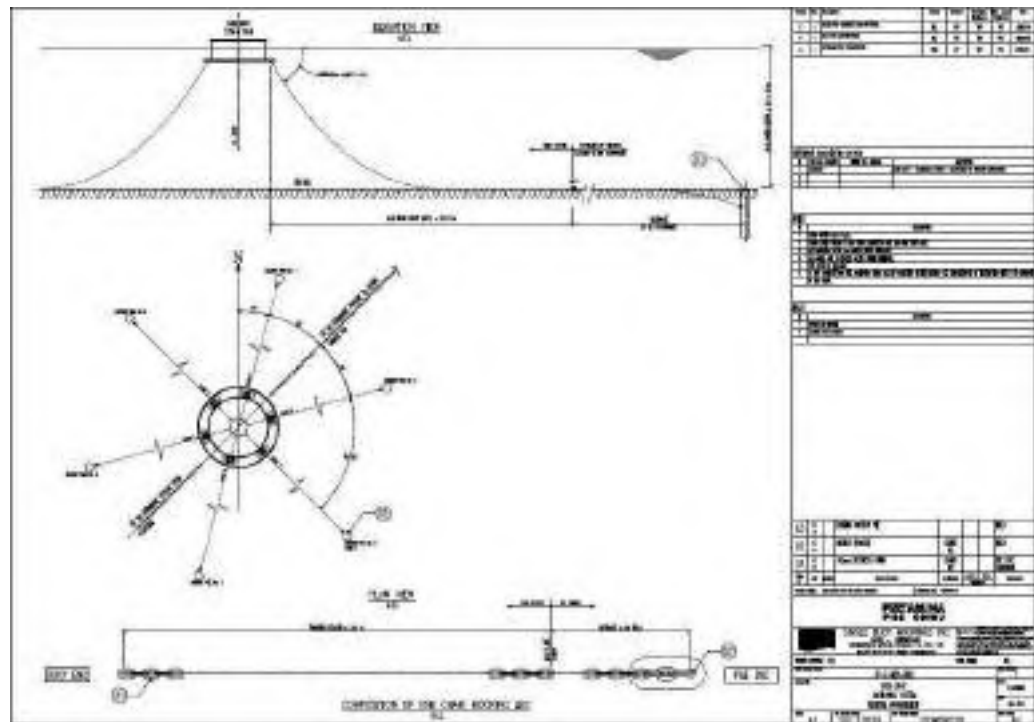
- **MODEL FSO ARCO ARDJUNA (MOSES)**



- **GENERAL ARRANGEMENT SINGLE POINT MOORING 3**



- **ANCHORING SYSTEM GENERAL ARRANGEMENT**

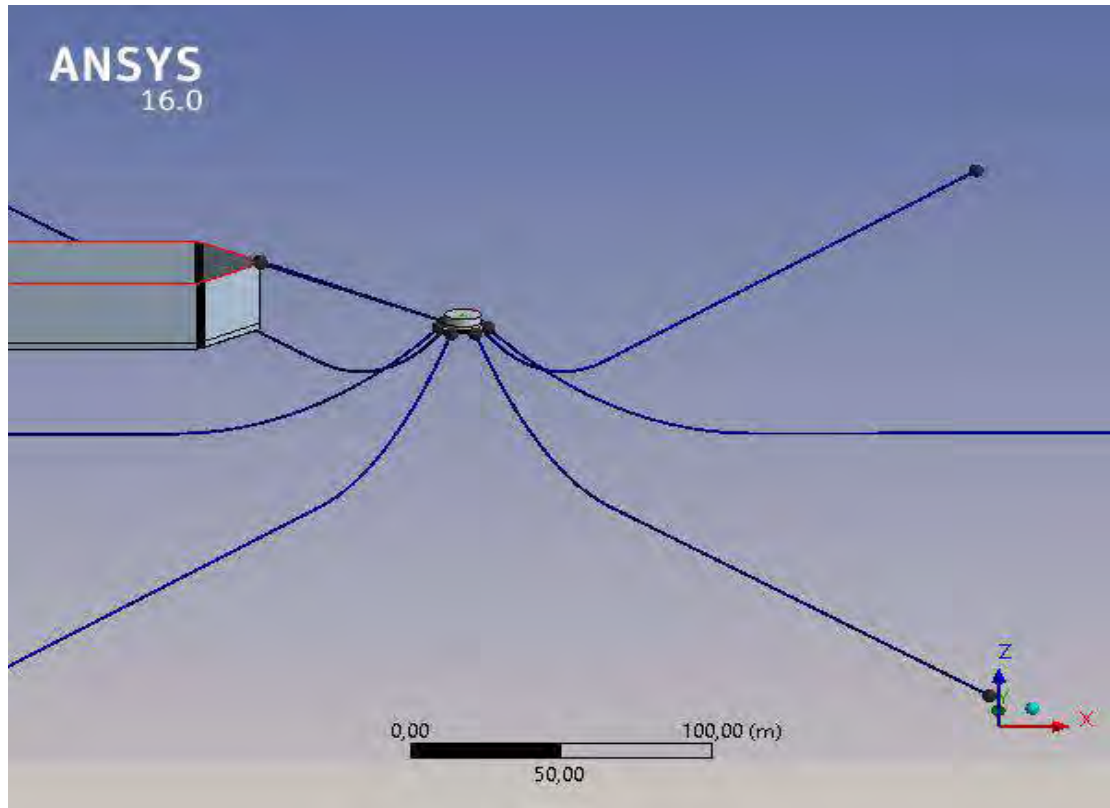


- **MODEL CHAIN AUTOCAD**



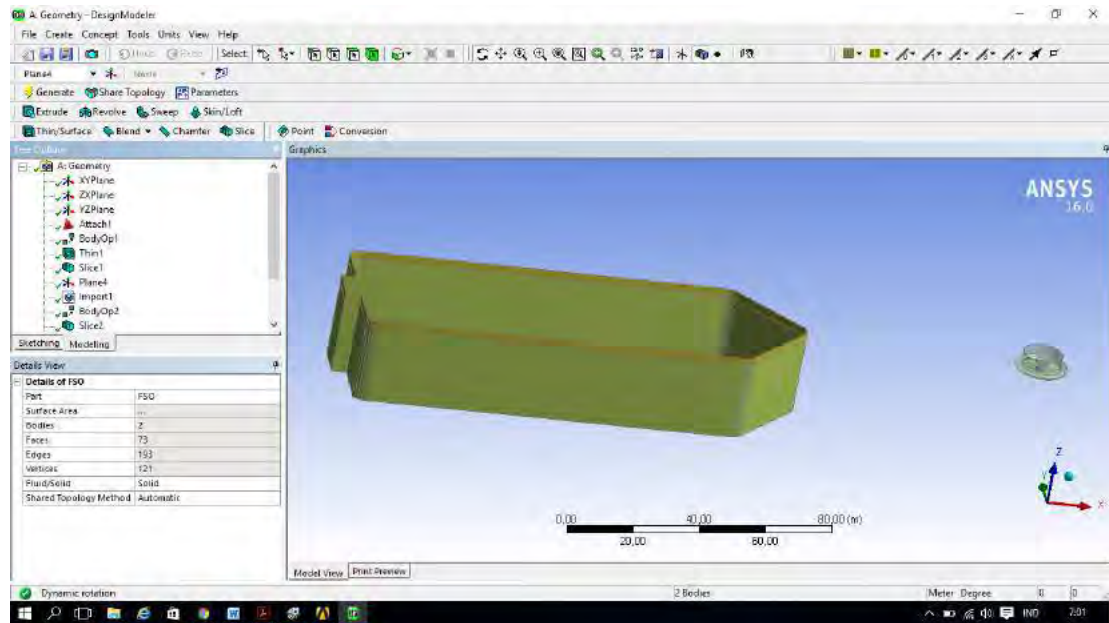
LAMPIRAN B

Hasil *Input* dan *Output* Ansys AQWA



Software Ansys AQWA digunakan penulis untuk memodelkan struktur dan pengatur konfigurasi sesuai dengan kondisi operasi dan pembebanan yang sudah dibatasi.

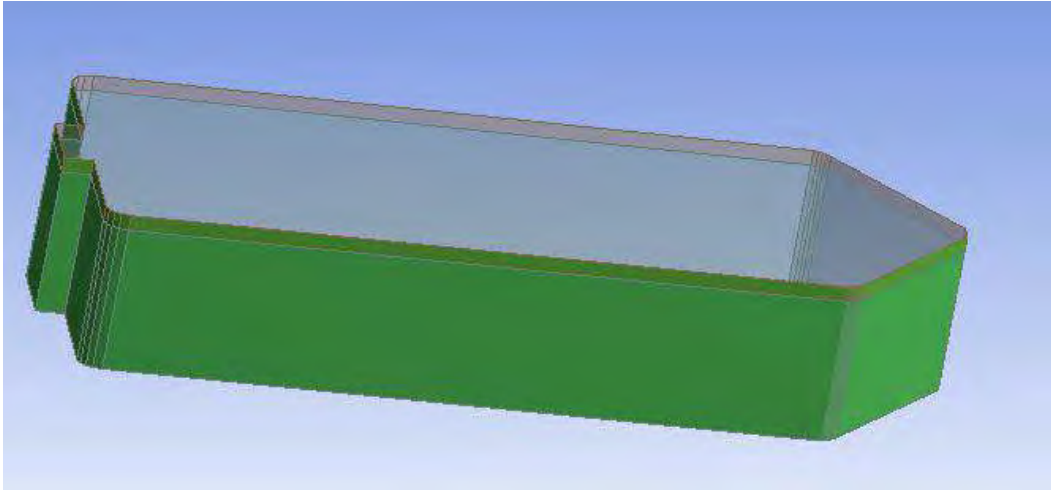
- Permodelan struktur FSO Arco Ardjuna dan SPM 3 yang sudah dimodelkan pada Software Maxsurf diexport ke software Ansys AQWA dan disesuaikan Geometrinya sesuai dengan data-data luaran Maxsurf Modeller.



i.

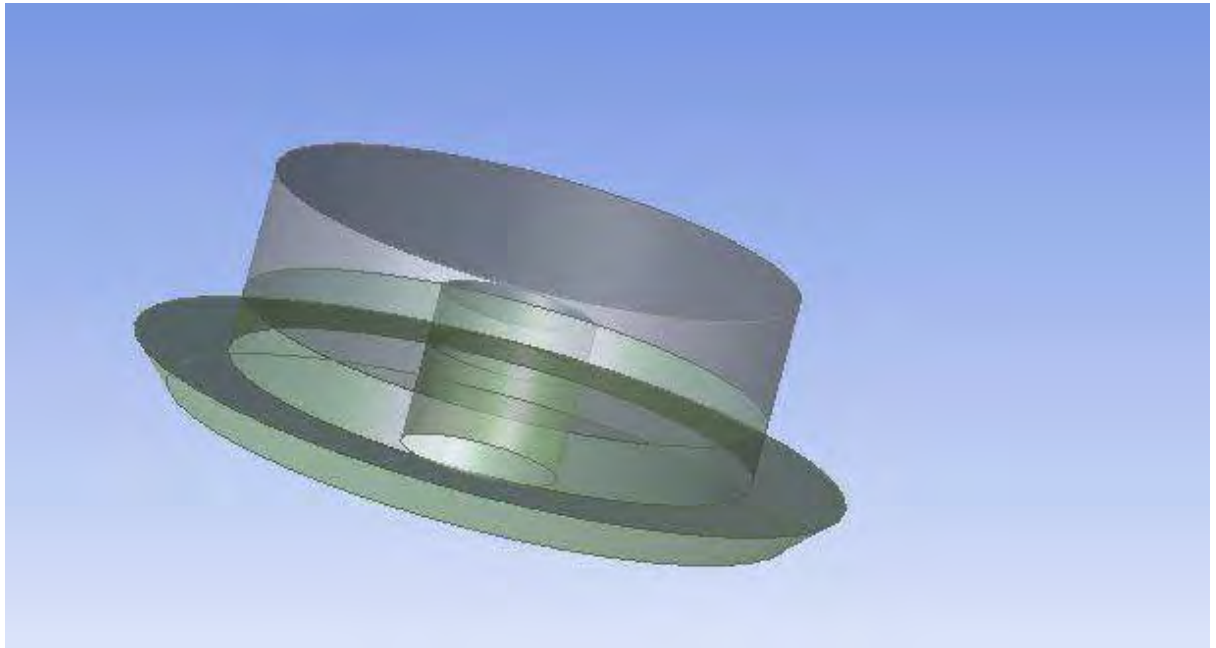
Model (B3, C3) > Geometry

Object Name	Geometry
State	Fully Defined
Details of Geometry	
Attached Assembly Name	D:\kuliah\FINAL\5. dsg\ansys\LIGHT_files\dp0\Geom\DM\Geom.agdb
Sea Geometry	
Water Depth	45 m
Water Density	1025 kg/m ³
Water Size X	1000 m
Water Size Y	1000 m
Import Preferences	
Import Solid Bodies	No
Import Surface Bodies	Yes
Import Line Bodies	Yes

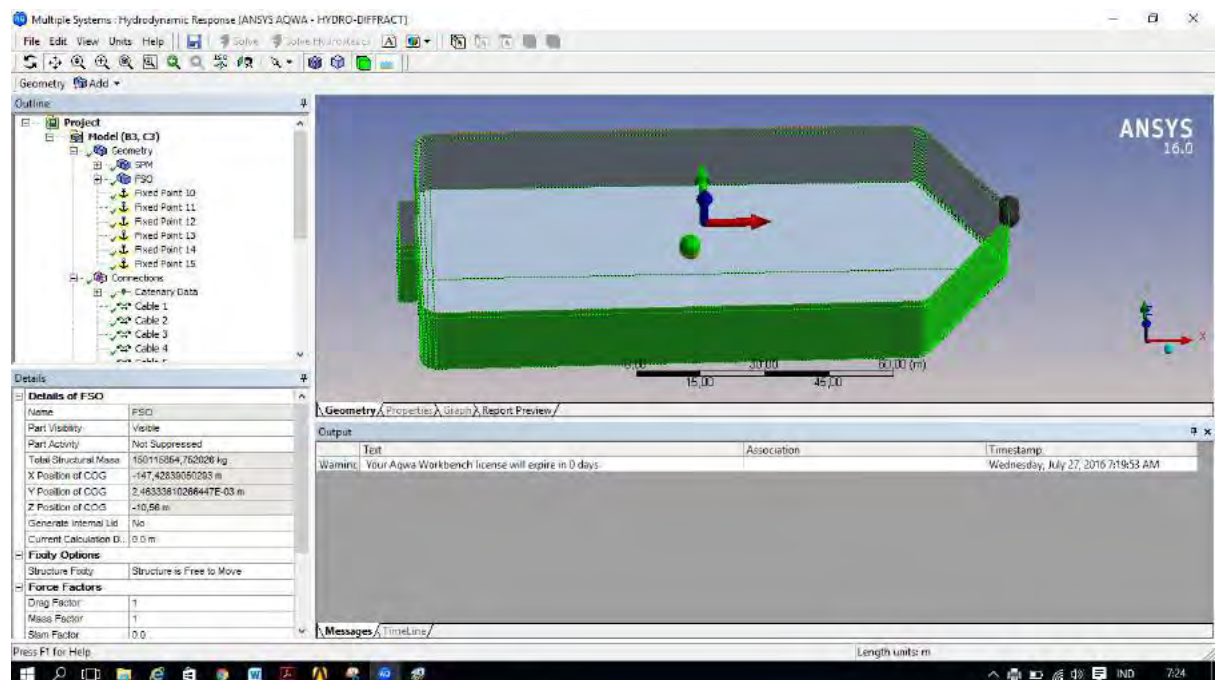


Model (B3, C3) > Geometry > Part

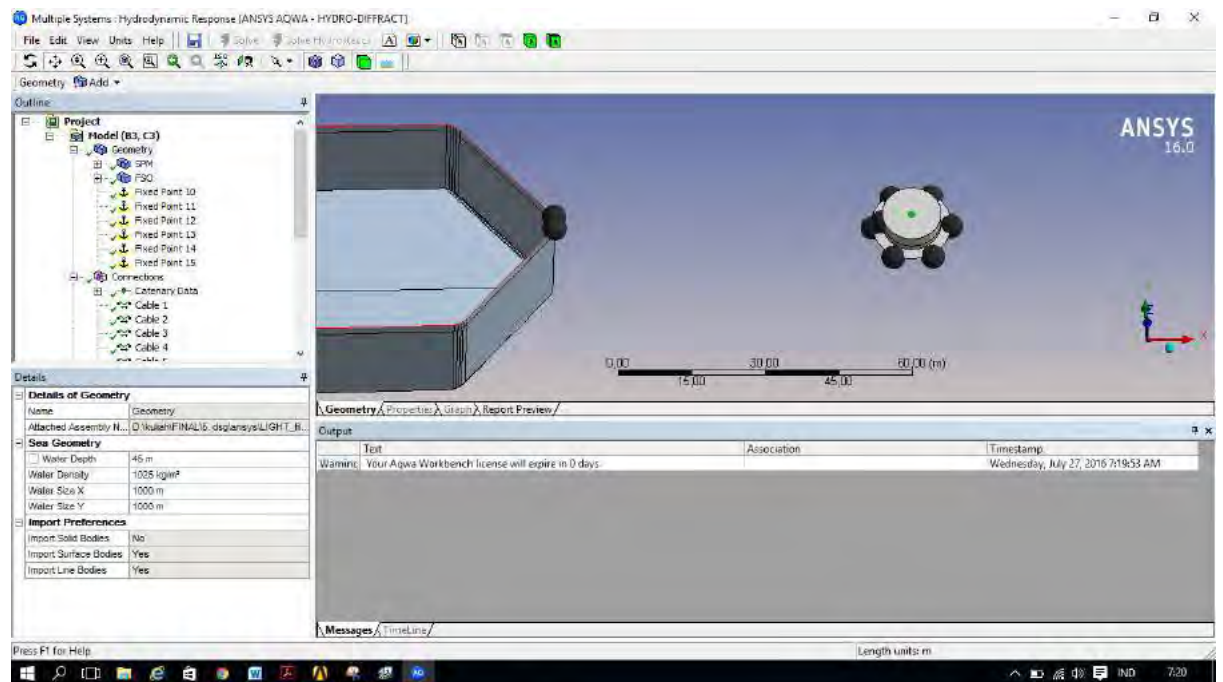
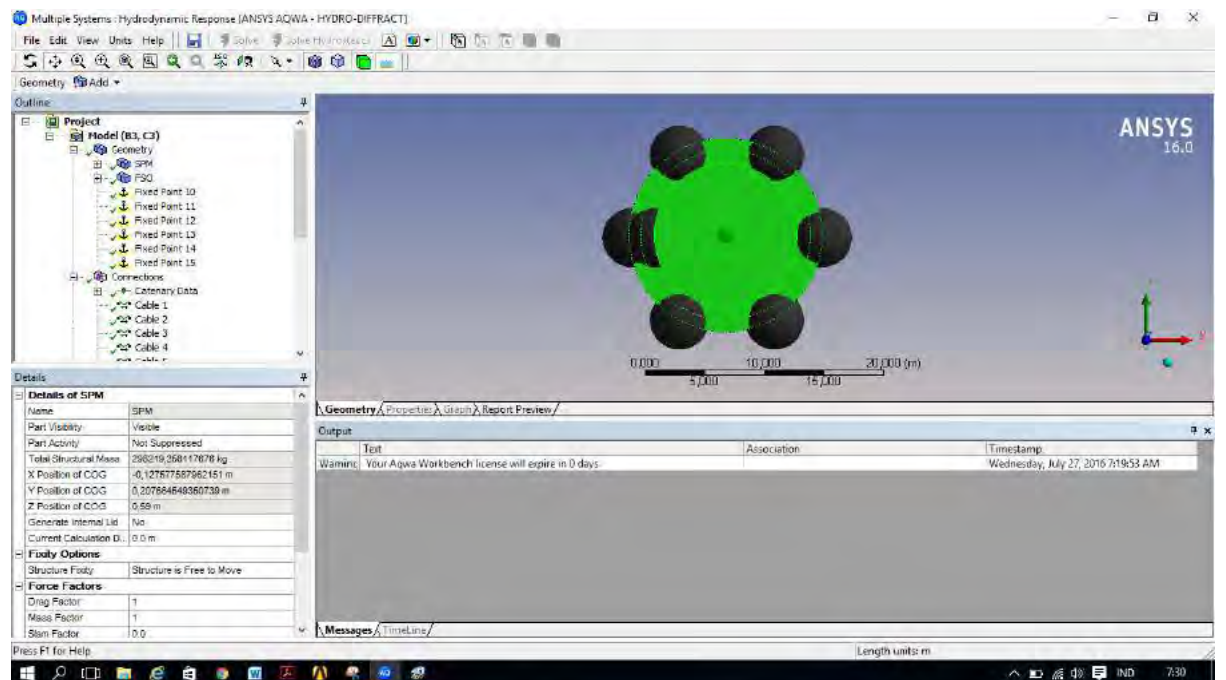
Object Name	<i>SPM</i>
State	Fully Defined
Details of SPM	
Part Visibility	Visible
Suppressed	Not Suppressed
Total Structural Mass	298219,258117676 kg
X Position of COG	-0,127577677369118 m
Y Position of COG	0,20766444504261 m
Z Position of COG	0,59 m
Kxx	7,63 m
Kyy	7,63 m
Kzz	10,61 m
Ixx	17361400,7279109 kg.m ²
Ixy	0.0 kg.m ²
Ixz	0.0 kg.m ²
Iyy	17361400,7279109 kg.m ²
Iyz	0.0 kg.m ²
Izz	33571168,1467488 kg.m ²



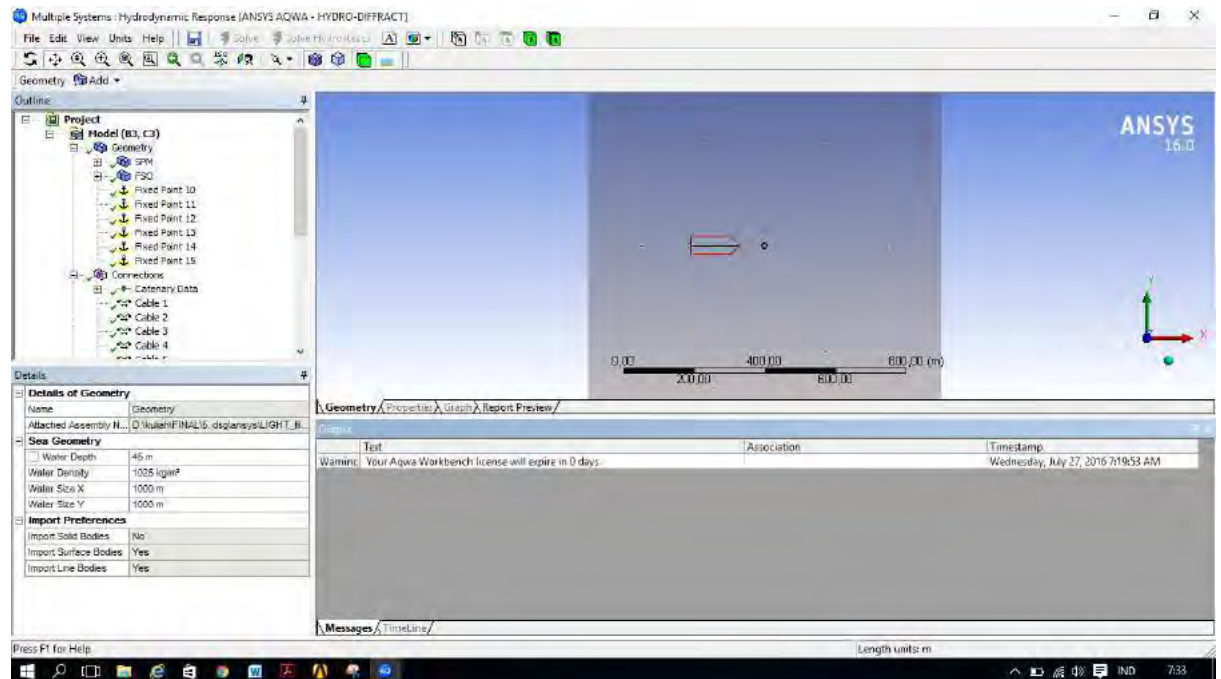
- Setelah model telah selesai disesuaikan dengan data yang dimiliki, maka pembuatan konfigurasi mooring (tambat) dapat dilakukan. Dengan mengatur connection point pada software Ansys AQWA
- Membuat titik penghubung pada FSO untuk menghubungkan FSO dan SPM menggunakan *hawser*, serta membuat titik penghubung antara SPM dan dasar laut dengan dihubungkan dengan rantai jangkar
- Titik peletakan connection Hawser pada FSO Arco Ardjuna



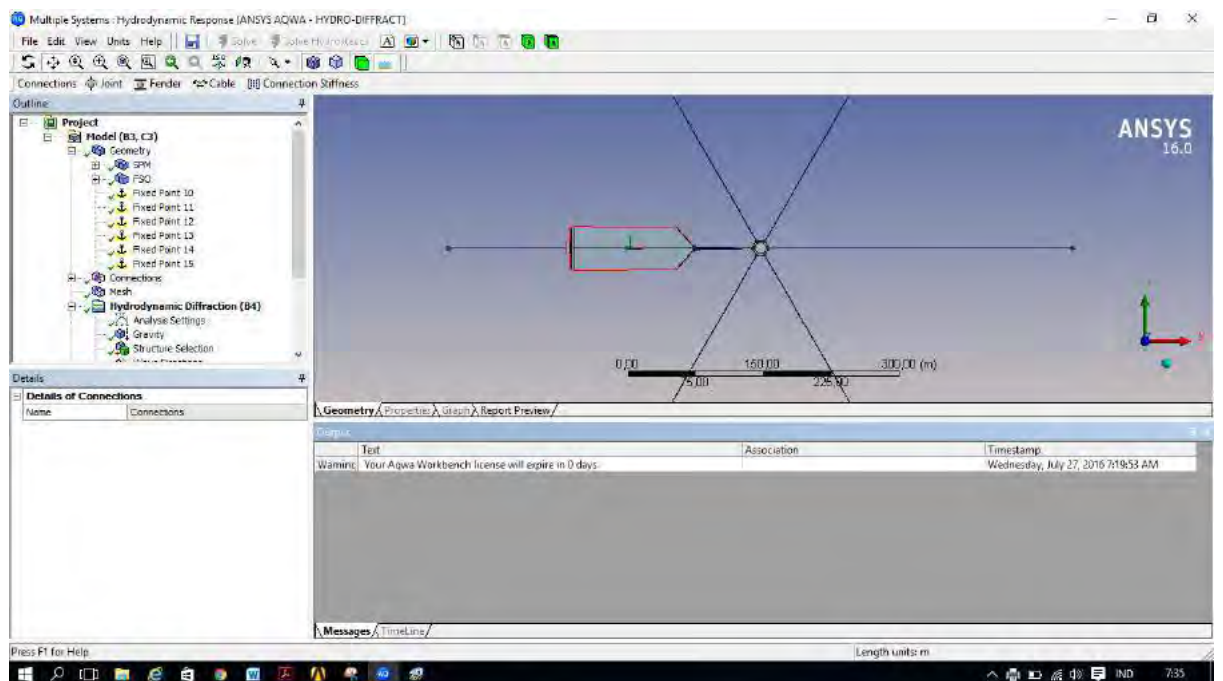
- Titik penghubung pada SPM



- Titik fix pada *seabed*



- Setiap titik penghubung dihubungkan sesuai konfigurasi yang ada



- Dilakukan Running Model

Model (B3, C3) > Hydrodynamic Time Response (C4) > Solution (C5) > Time History Motions

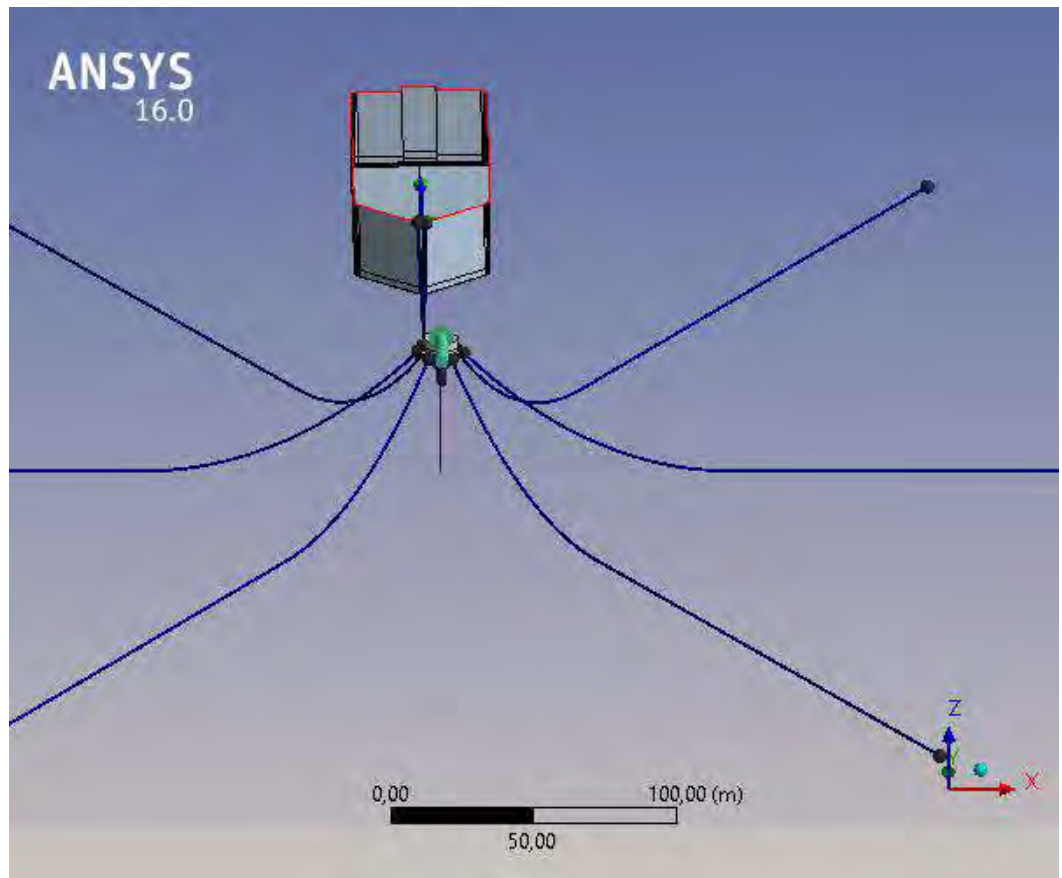


TABLE 109

Model (B3, C3) > Hydrodynamic Time Response (C4) > Solution (C5) > Hydrodynamic Graph Results

Object Name	<i>Cable Forces, Whole Cable Forces (Force/Moment vs Time)</i>
State	Solved
Details of Cable Forces, Whole Cable Forces (Force/Moment vs Time)	
Presentation Method	Line
Axes Selection	Force/Moment vs Time
Export CSV File	Select CSV File...
Line A	
Structure	SPM
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces

Component	Tension
Connection	Cable 3
Position of Min in X	3489
Position of Max in X	5304
Minimum Value	52716,777
Maximum Value	418693,844
Line B	
Structure	SPM
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 4
Position of Min in X	3489
Position of Max in X	7119
Minimum Value	42157,422
Maximum Value	463761
Line C	
Structure	SPM
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 5
Position of Min in X	3489
Position of Max in X	7119
Minimum Value	53049,637
Maximum Value	448032,063
Line D	
Structure	SPM
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 6
Position of Min in X	3489
Position of Max in X	3505,5
Minimum Value	68927,031
Maximum Value	420979,875

FIGURE 22

**Model (B3, C3) > Hydrodynamic Time Response (C4) > Solution (C5) > Cable Forces,
Whole Cable Forces (Force/Moment vs Time)**

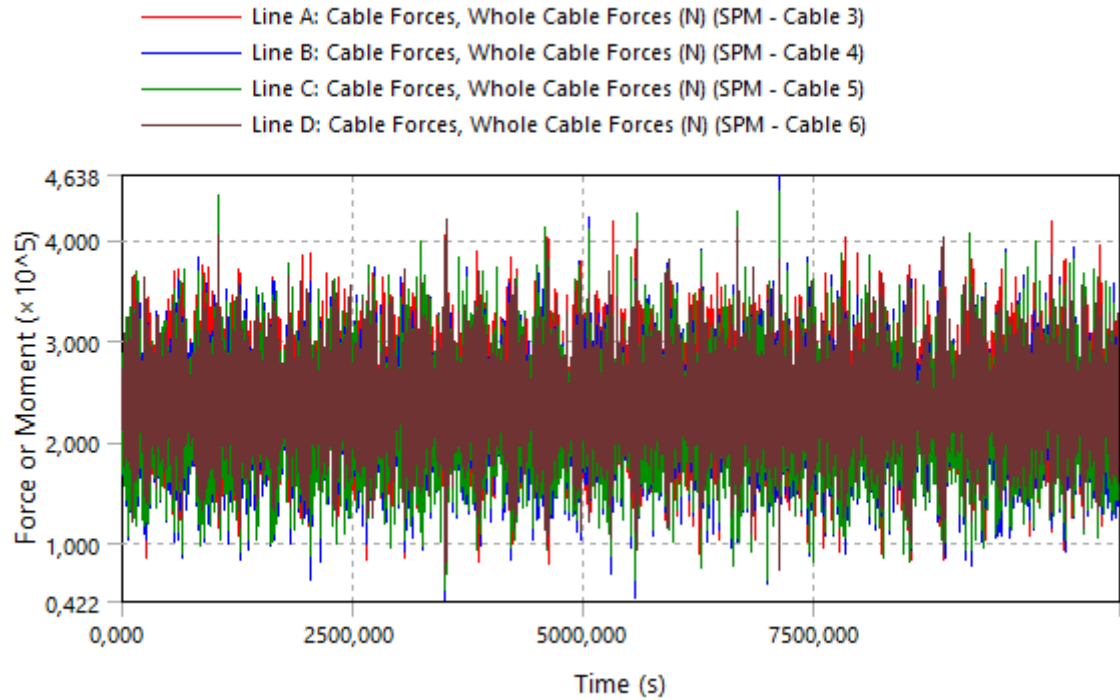


TABLE 111

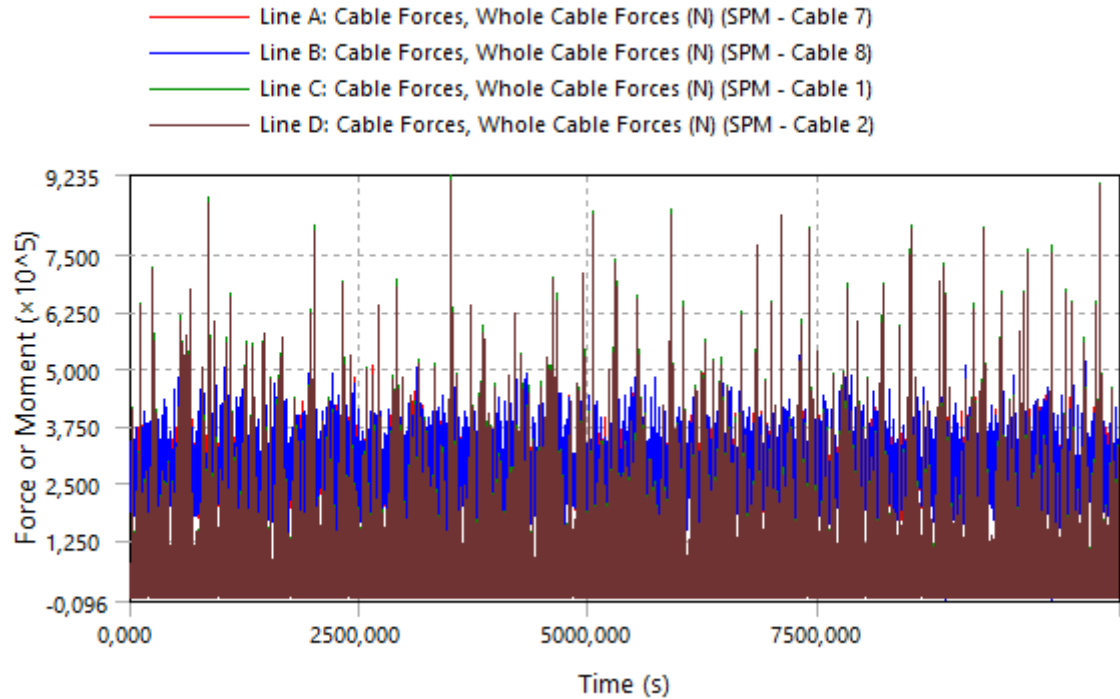
**Model (B3, C3) > Hydrodynamic Time Response (C4) > Solution (C5) > Hydrodynamic
Graph Results**

Object Name	<i>Cable Forces, Whole Cable Forces (Force/Moment vs Time)</i>
State	Solved
Details of Cable Forces, Whole Cable Forces (Force/Moment vs Time)	
Presentation Method	Line
Axes Selection	Force/Moment vs Time
Export CSV File	Select CSV File...
Line A	
Structure	SPM
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 7

Position of Min in X	8887,5
Position of Max in X	9202,5
Minimum Value	16633,777
Maximum Value	560353,375
Line B	
Structure	SPM
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 8
Position of Min in X	10059
Position of Max in X	5304
Minimum Value	-9559,563
Maximum Value	596906,5
Line C	
Structure	SPM
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 1
Position of Min in X	19,5
Position of Max in X	3492
Minimum Value	0.0
Maximum Value	923454,75
Line D	
Structure	SPM
Type	Cable Forces
SubType	Whole Cable Forces
Component	Tension
Connection	Cable 2
Position of Min in X	19,5
Position of Max in X	3492
Minimum Value	0.0
Maximum Value	909694,688

FIGURE 23

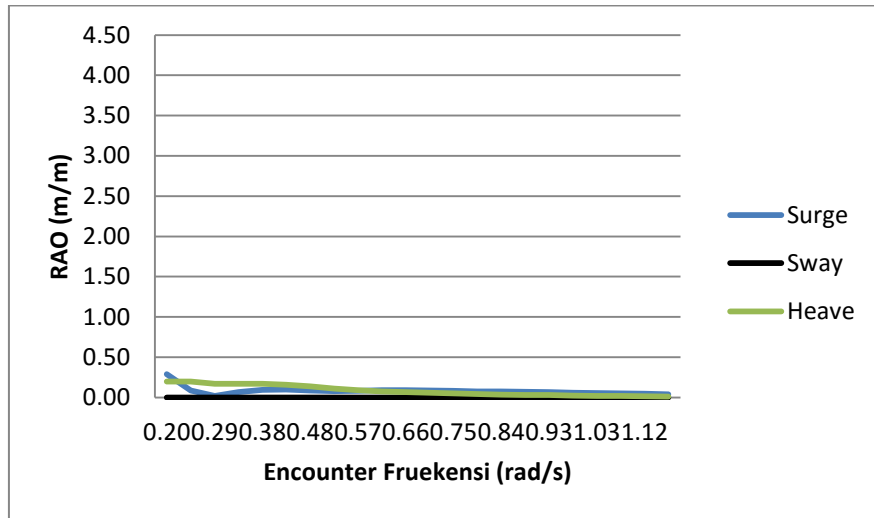
**Model (B3, C3) > Hydrodynamic Time Response (C4) > Solution (C5) > Cable Forces,
Whole Cable Forces (Force/Moment vs Time)**



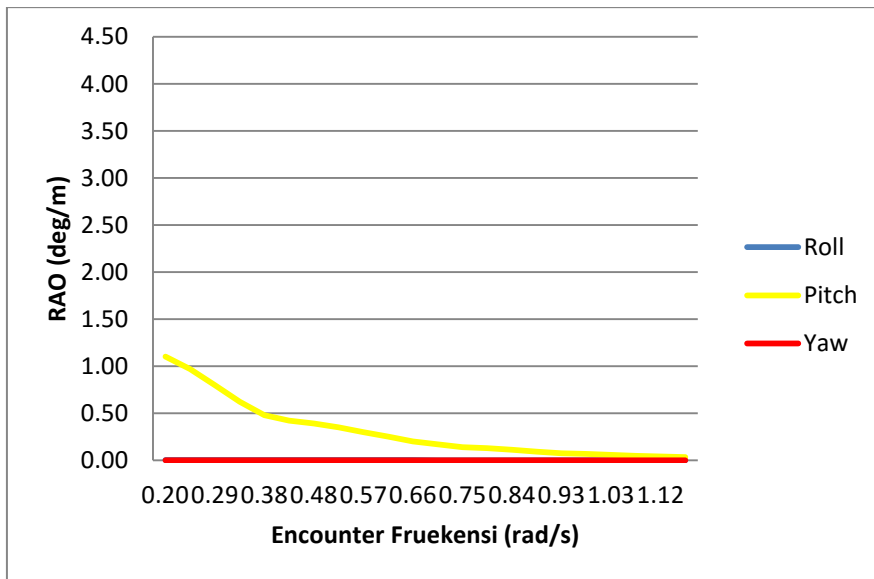
RAO FSO Arco Ardjuna kondisi *free floating*

Perhitungan karakteristik gerakan FSO Arco Ardjuna saat kondisi *free floating* dilakukan pada kondisi *light load* dan *full load*. Pada kondisi *light load* dilakukan pada sarat 2,5 m, sedangkan pada kondisi *full load* dilakukan pada sarat 24 m, dengan kedalaman laut 45 m. Berikut adalah grafik RAO FSO Arco Ardjuna pada kondisi *light load* maupun *full load* untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, dan *yaw* dengan *heading* pembebanan 0° , 90° , 180°

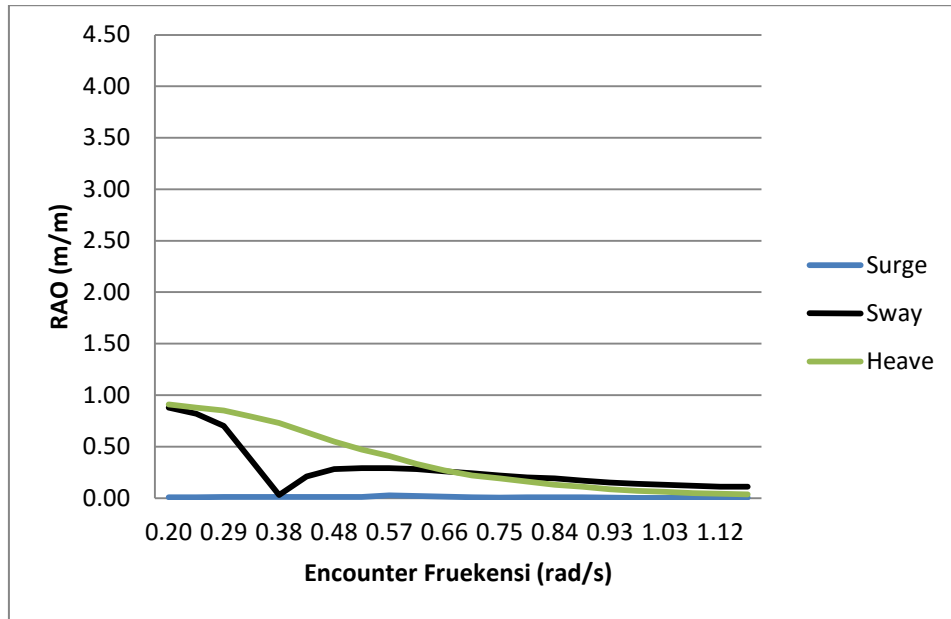
RAO FSO kondisi *Light Load*



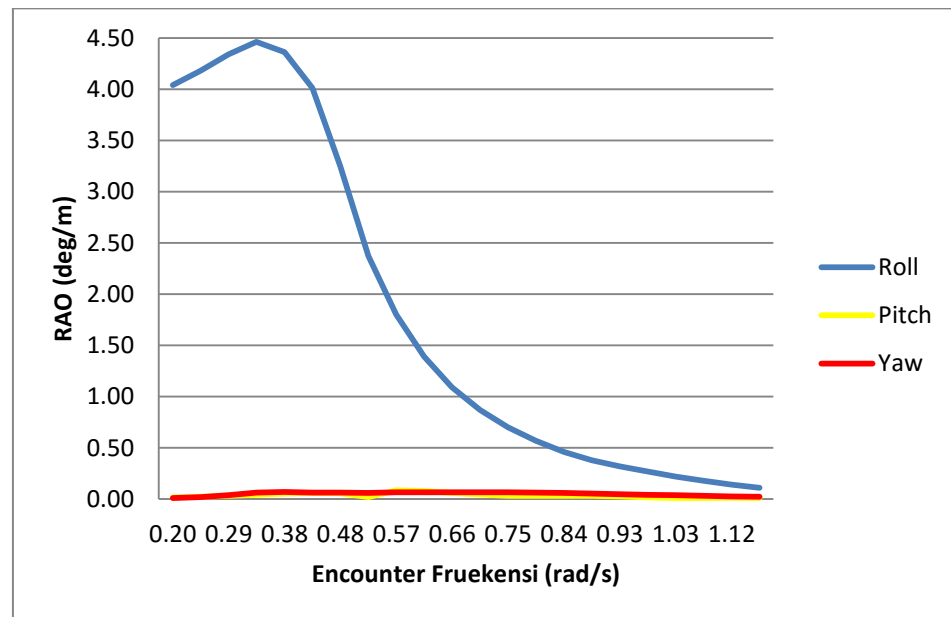
Grafik RAO gerakan *translasional* FSO Arco Ardjuna light condition pada heading 0°



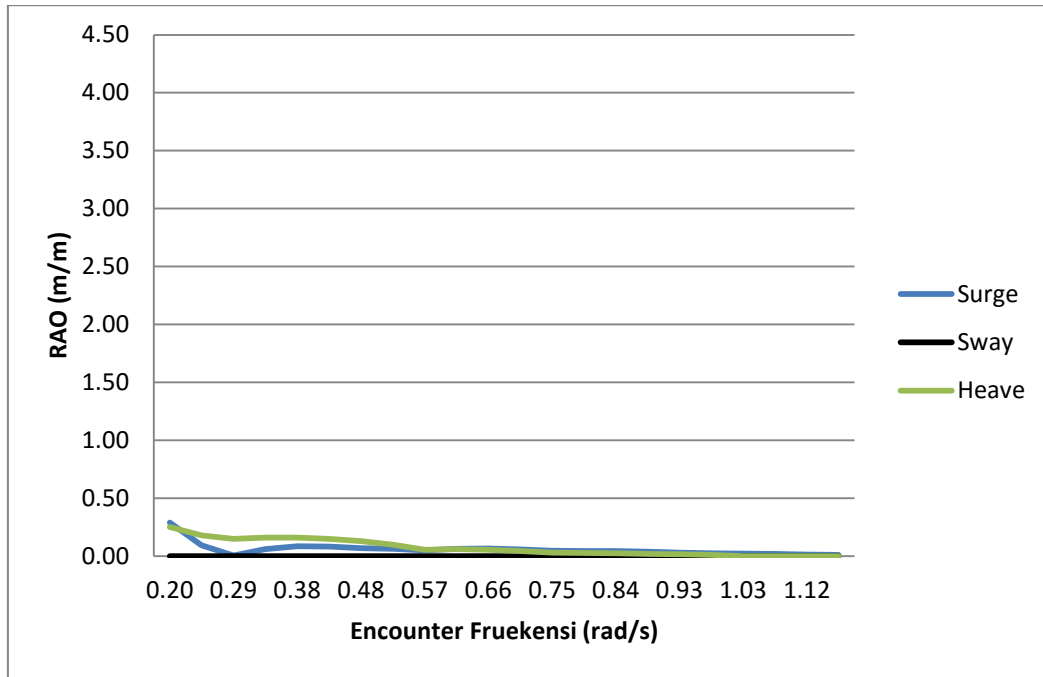
Grafik RAO gerakan *rotasional* FSO Arco Ardjuna light condition pada heading 0°



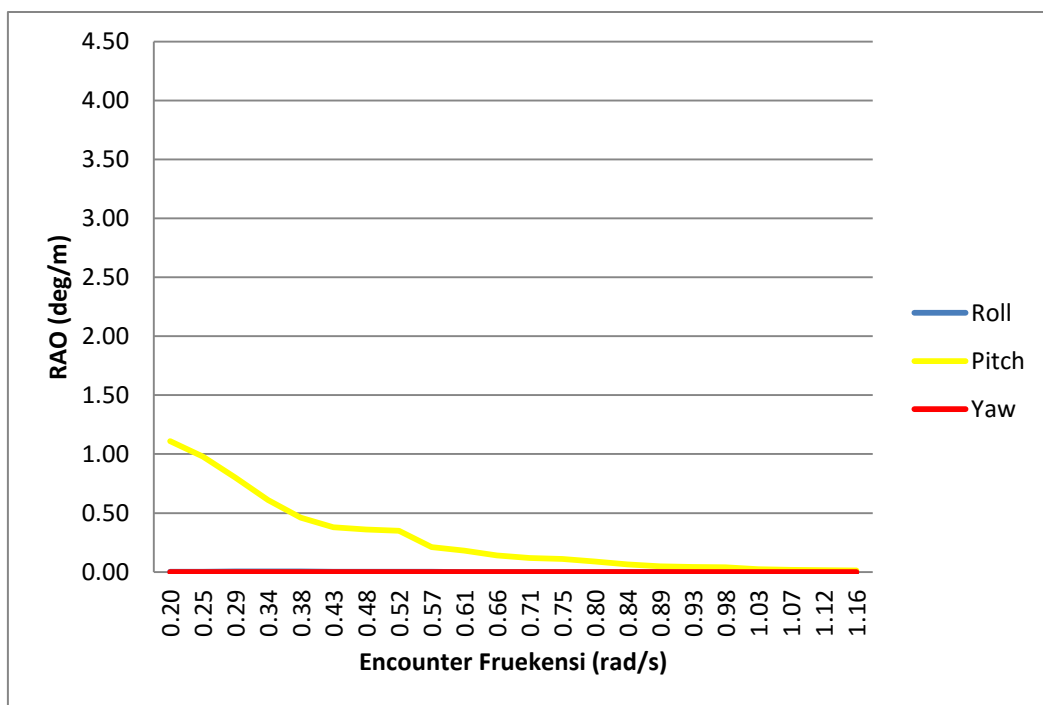
Grafik RAO gerakan *translational* FSO Arco Ardjuna *light condition* pada heading 90°



Grafik RAO gerakan *rotasional* FSO Arco Ardjuna *light condition* pada heading 90°

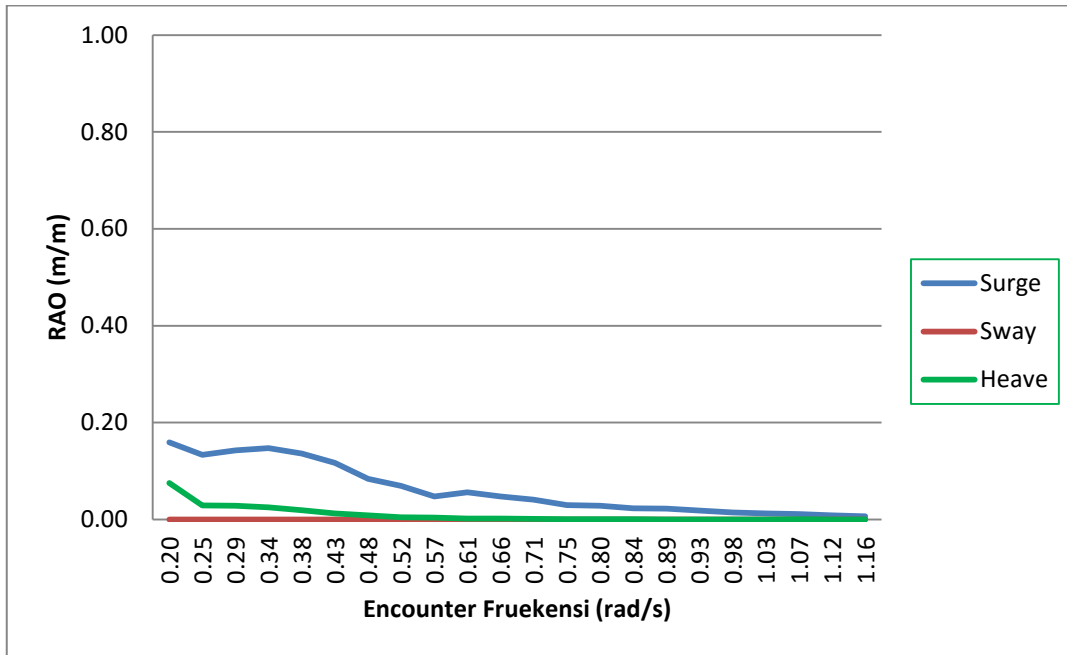


Grafik RAO gerakan *translasional* FSO Arco Ardjuna light condition pada heading 180°

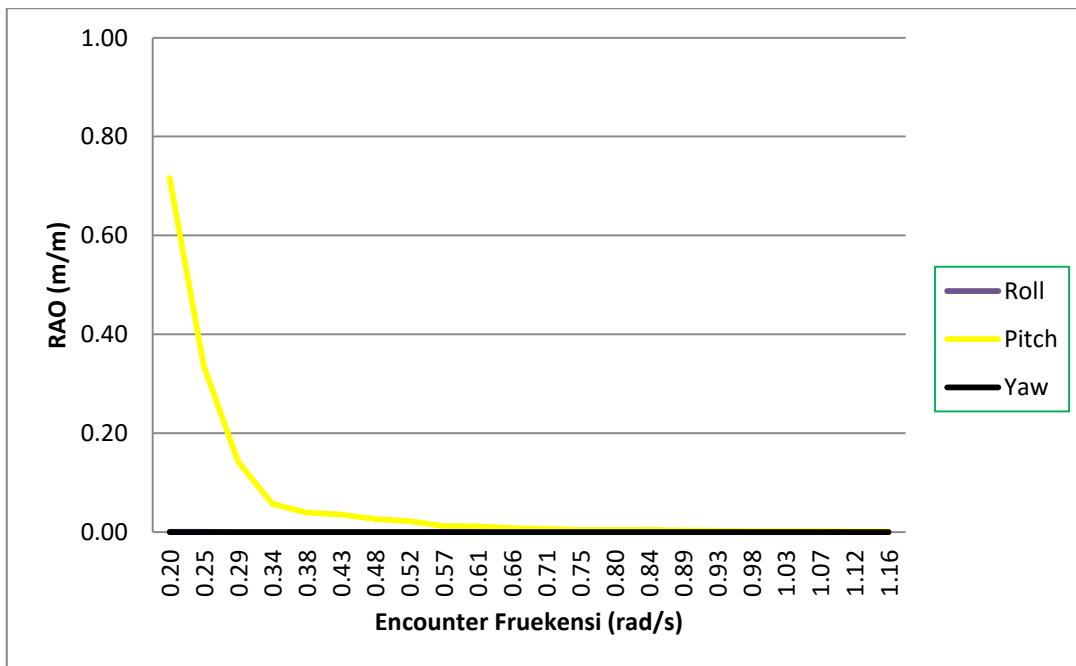


Grafik RAO gerakan *rotasional* FSO Arco Ardjuna light condition pada heading 180°

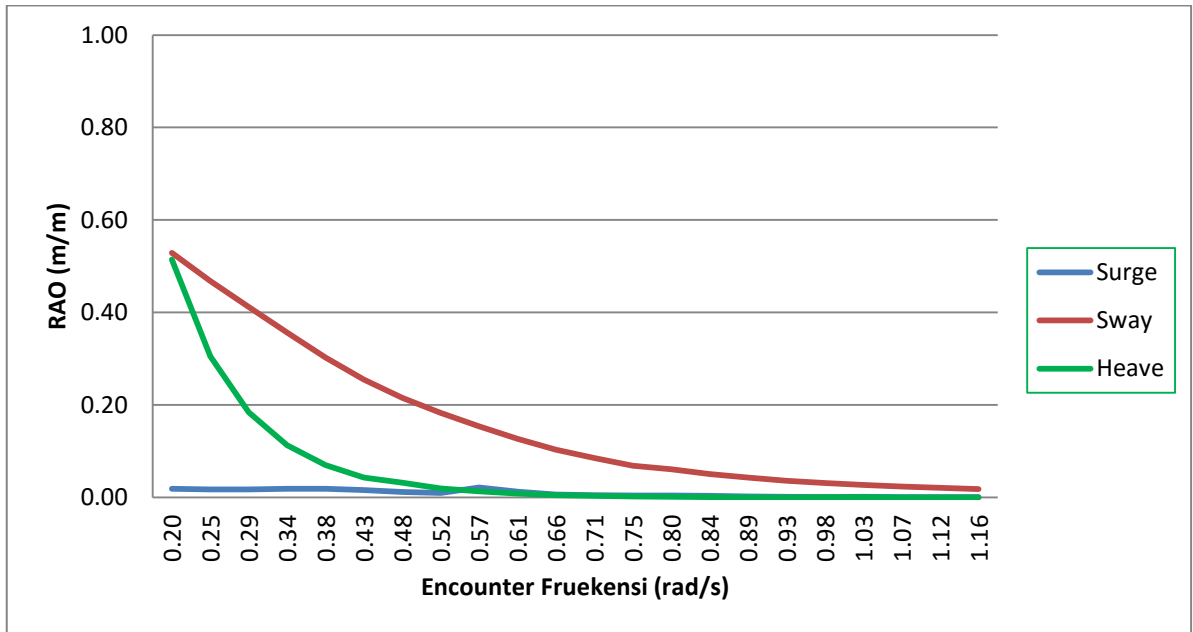
RAO FSO kondisi *Full Load*



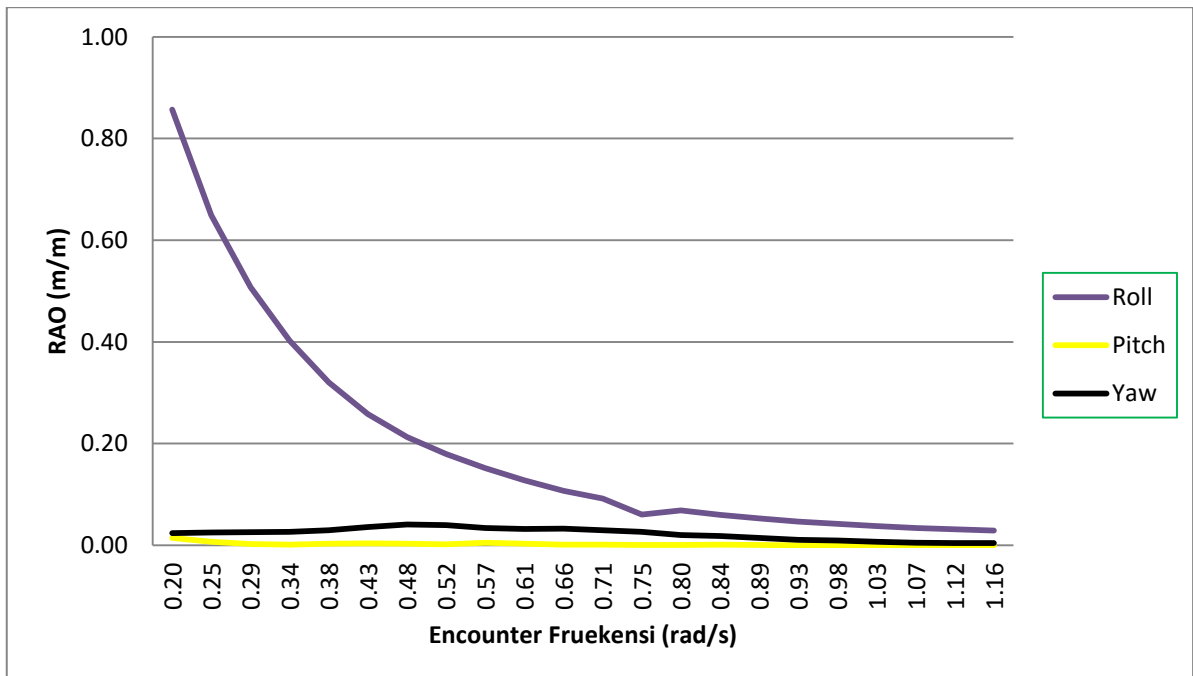
Grafik RAO gerakan *translasional* FSO Arco Ardjuna *full condition* pada heading 0°



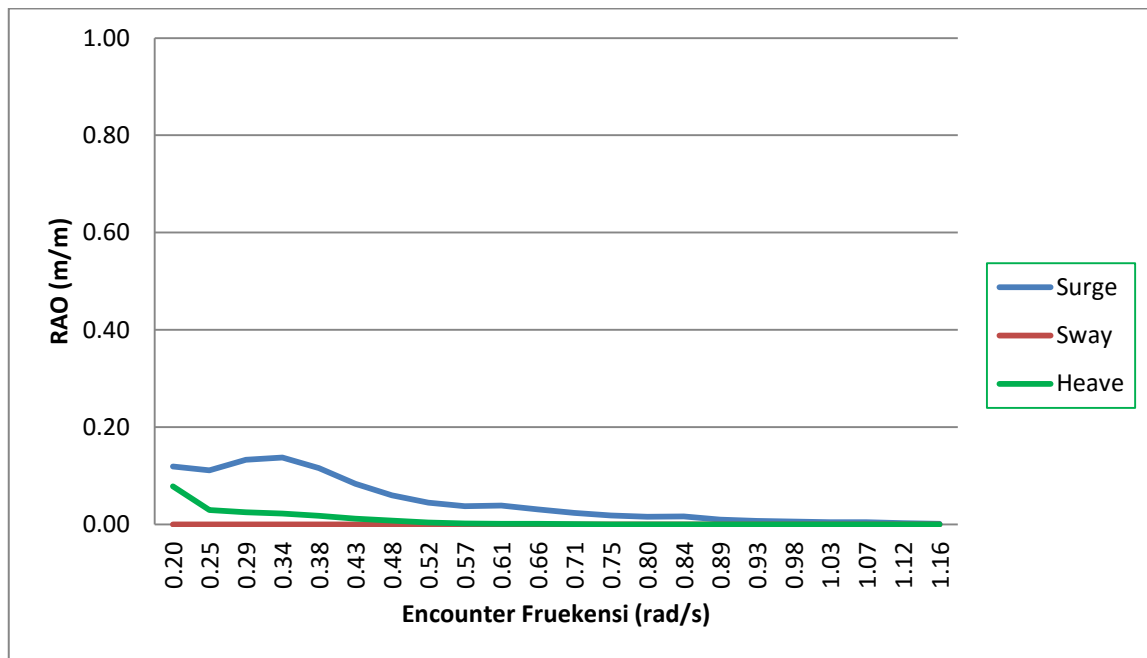
Grafik RAO gerakan *rotasional* FSO Arco Ardjuna *full condition* pada heading 0°



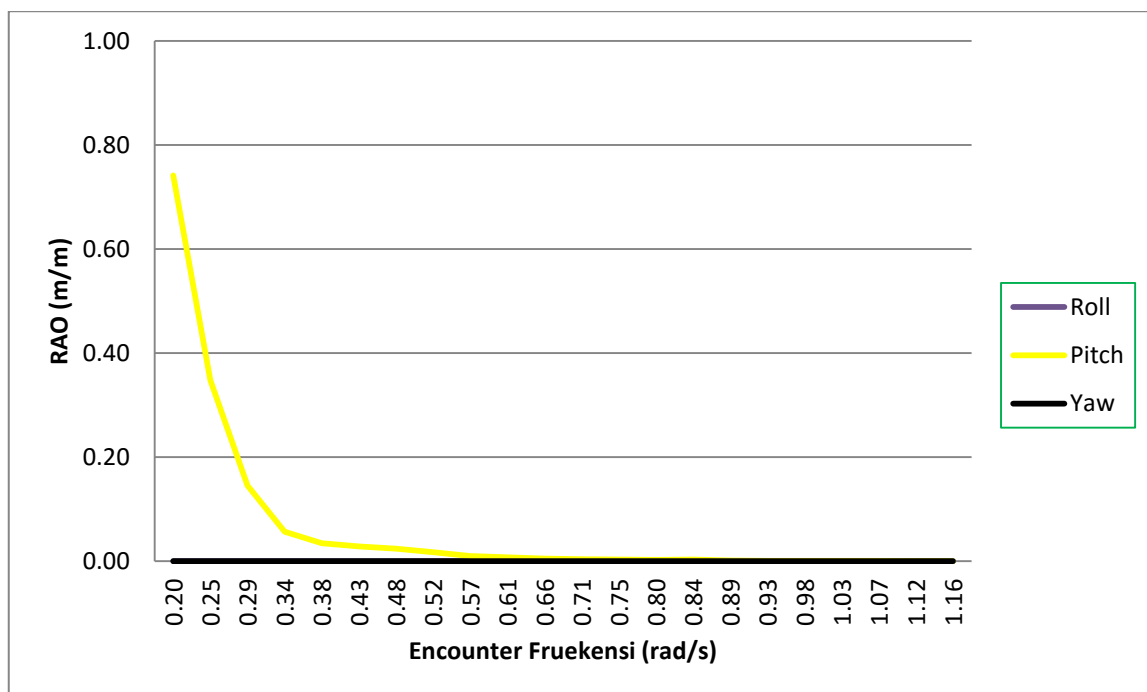
Grafik RAO gerakan *translasional* FSO Arco Ardjuna full condition pada heading 90°



Grafik RAO gerakan *rotasional* FSO Arco Ardjuna full condition pada heading 90°



Grafik RAO gerakan *translational* FSO Arco Ardjuna full condition pada heading 180°

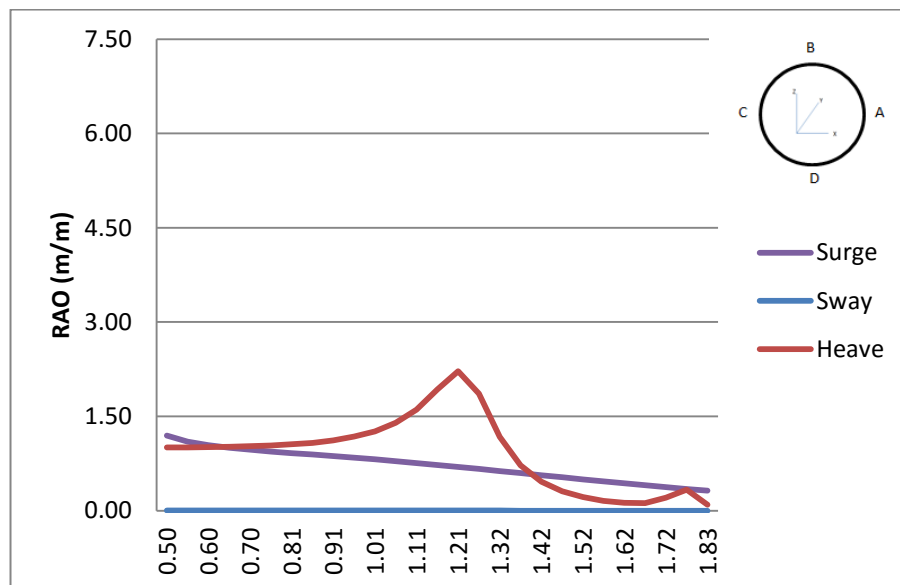


Grafik RAO gerakan *rotasional* FSO Arco Ardjuna full condition pada heading 180°

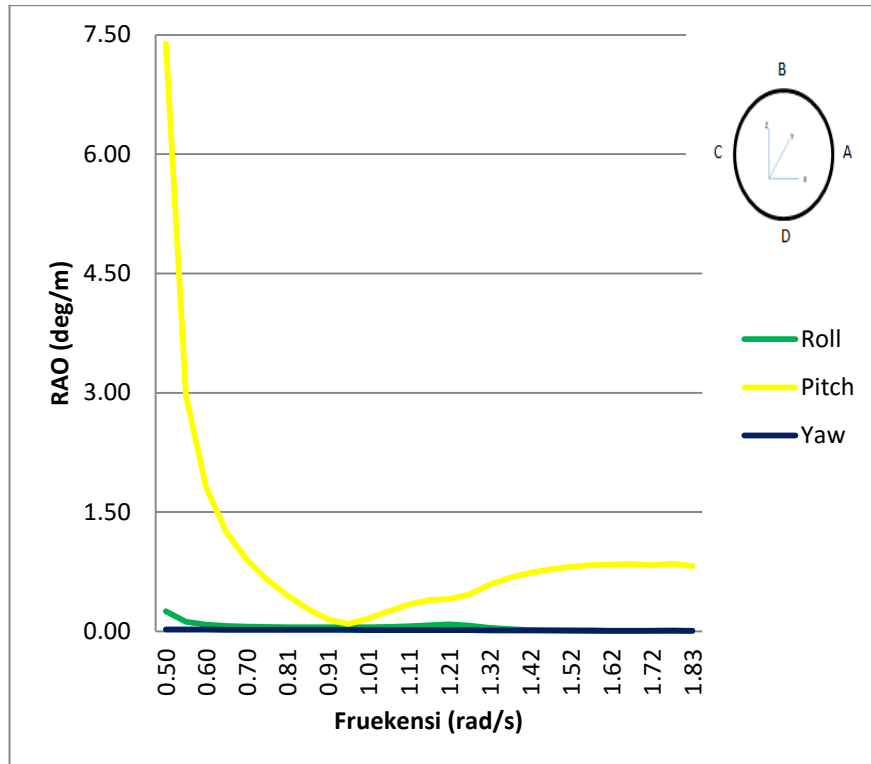
Gerakan struktur dalam kondisi *light load* lebih besar daripada gerakan pada saat kondisi *full load*. Pada gerakan osilasi transasional, RAO *surge* tertinggi terjadi pada arah gelombang 0° yaitu 0.351m/m. Untuk gerakan *sway* tertinggi yaitu 0.813 m/m terjadi saat *heading* 90°, sedangkan RAO *heave* tertinggi sebesar 0.820 juga terjadi pada *heading* 0°. Untuk gerakan osilasi rotasional RAO *roll* tertinggi yaitu 4.490 pada arah pembebanan 90°. RAO moda gerakan *pitch* terbesar terdapat pada *heading* 180° yaitu 1.238 deg/m. Untuk gerakan *yaw*, RAO mendekati 0. Sama halnya dengan kondisi *full load*, RAO untuk semua moda gerakan terjadi pada frekuensi(ω) antara 0.2-1.16 rad/s.

RAO Single Point Mooring 3 kondisi *free floating*

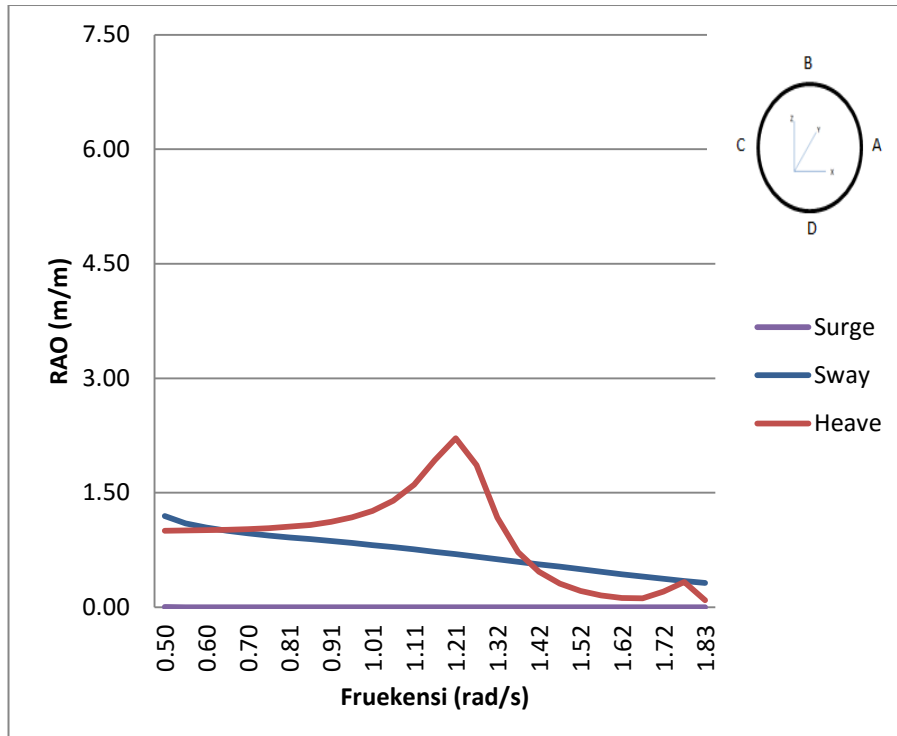
Analisi RAO pada SPM 3 saat kondisi *free floating* juga dilakukan untuk mengetahui bagaimana karakteristik pergerakan SPM 3 ketika dikenai pembebanan gelombang *heading*, 0, 90 dan 180 derajat. RAO gerakan SPM 3 kondisi *free floating*.



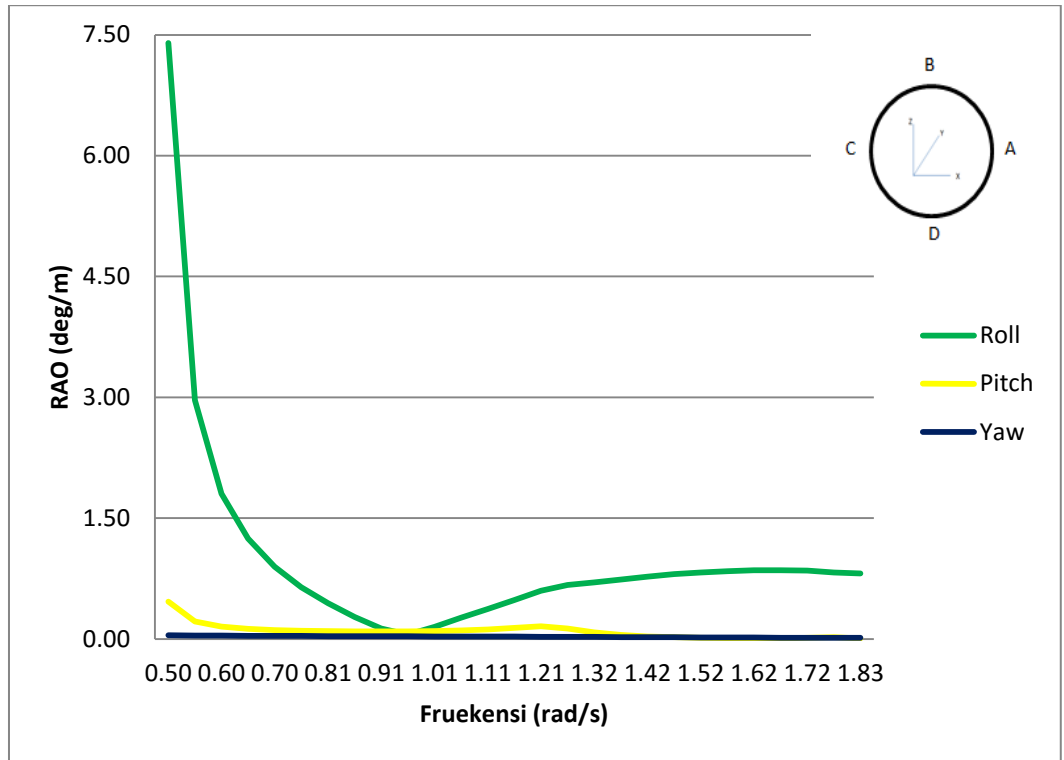
Grafik RAO Translasi SPM *Free Floating* pada *heading* 0 derajat



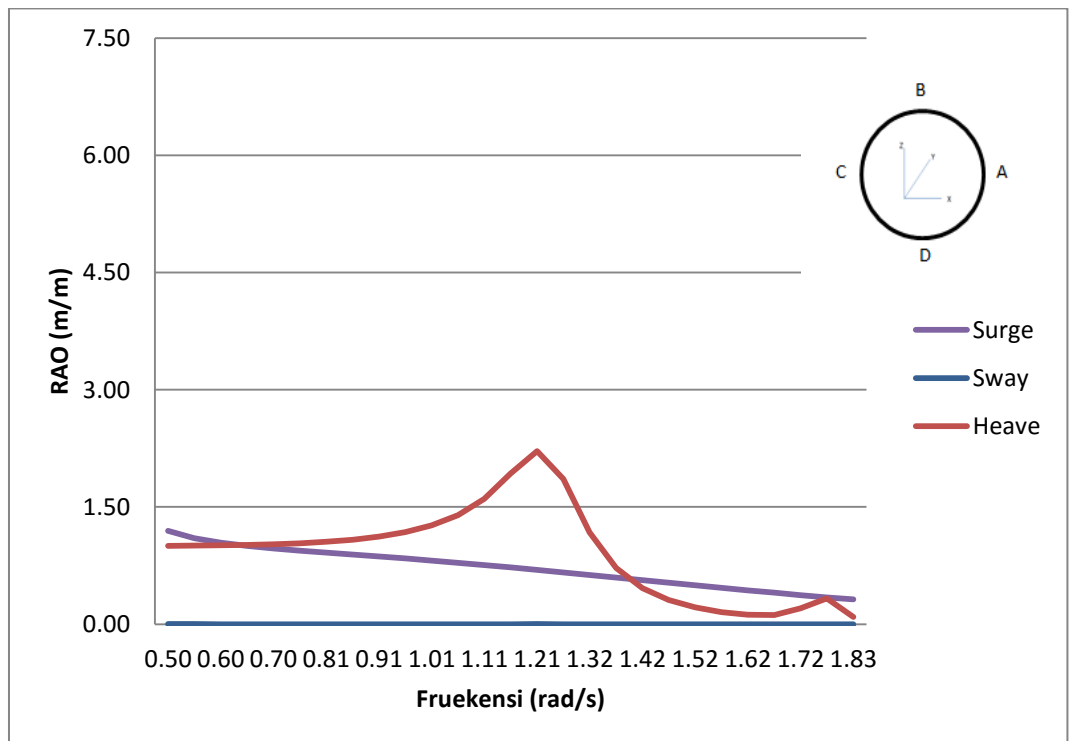
Grafik RAO Rotasi SPM *Free Floating* pada *heading* 0 derajat



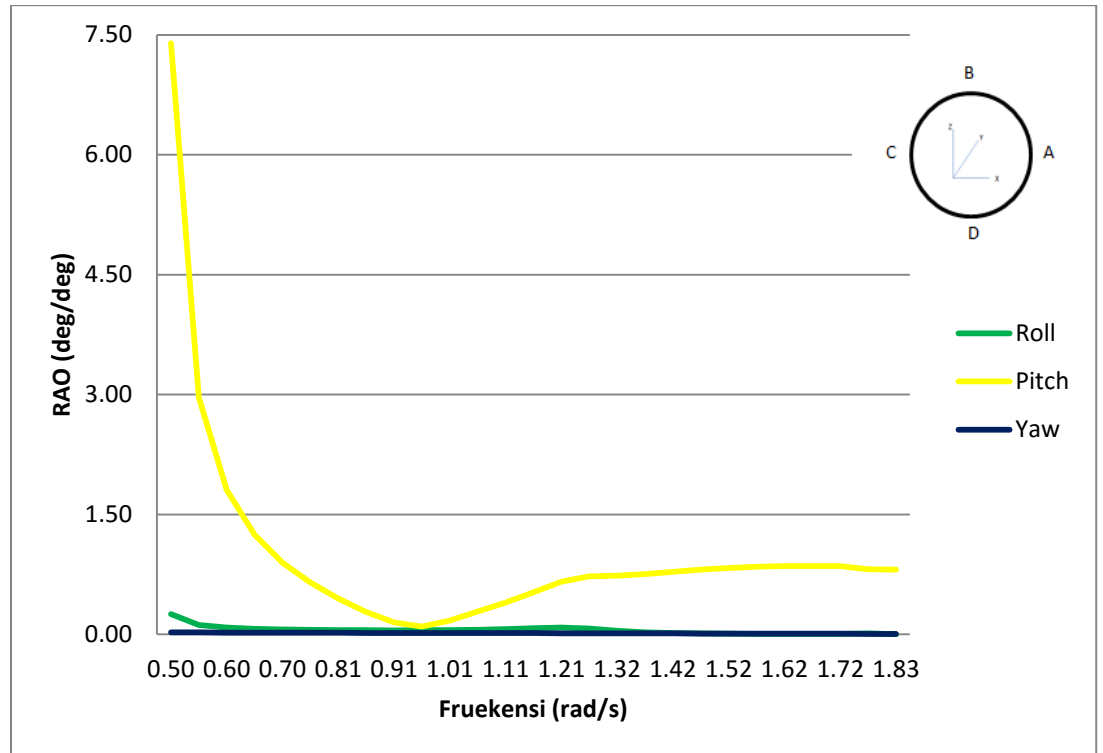
Grafik RAO Translasi FSO *Free Floating* pada *heading* 90 derajat



Grafik RAO Rotasi SPM *Free Floating* pada heading 90 derajat



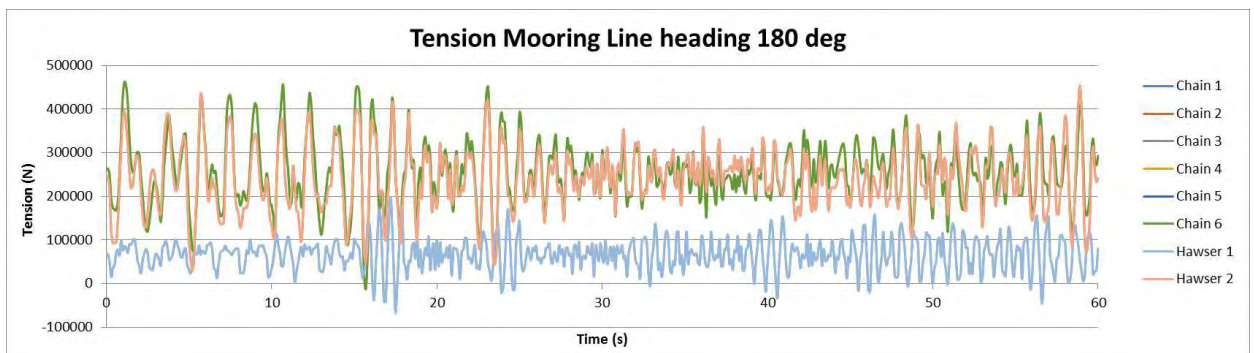
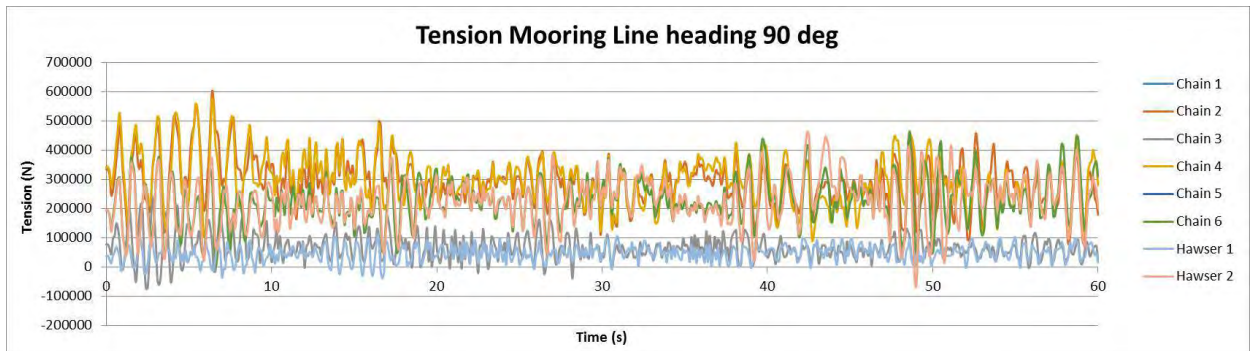
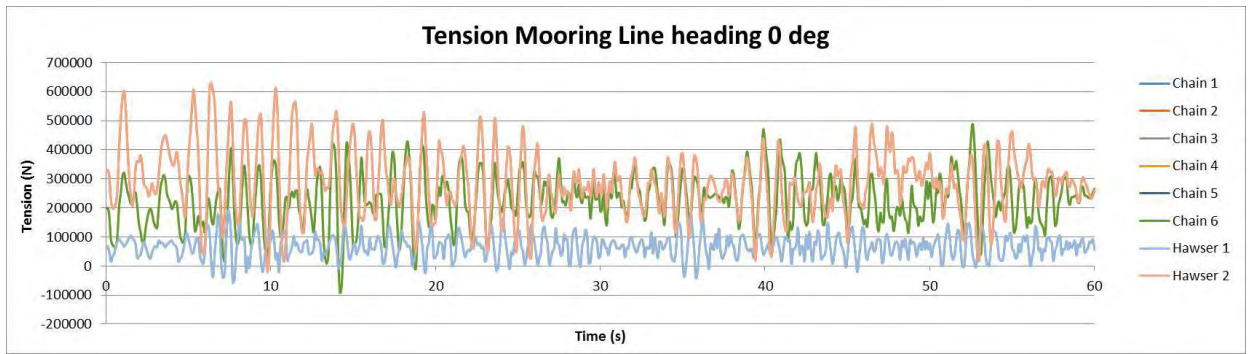
Grafik RAO Translasi FSO *Free Floating* pada heading 180 derajat



Grafik RAO Rotasi SPM *Free Floating* pada *heading* 180 derajat

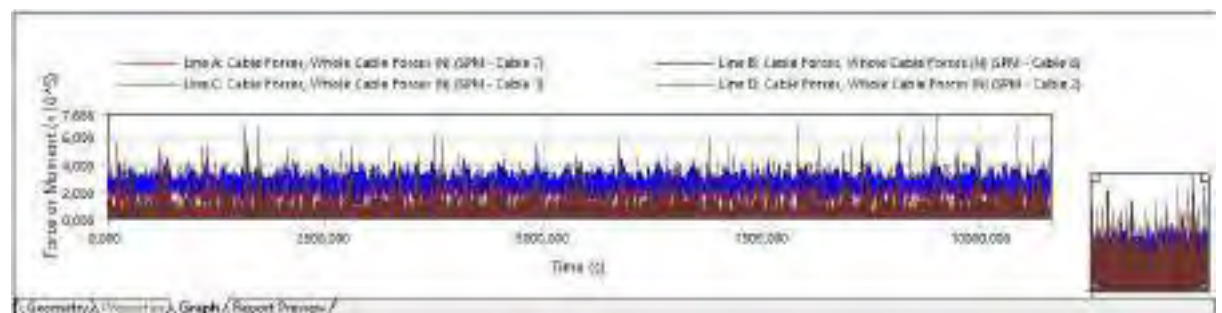
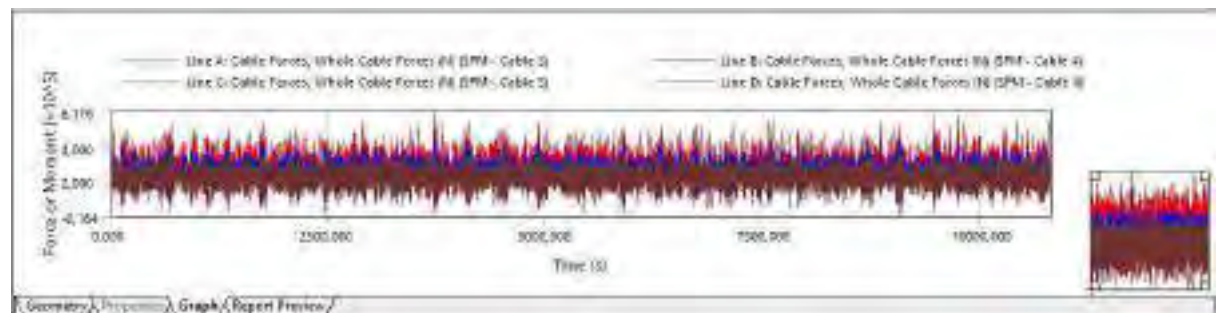
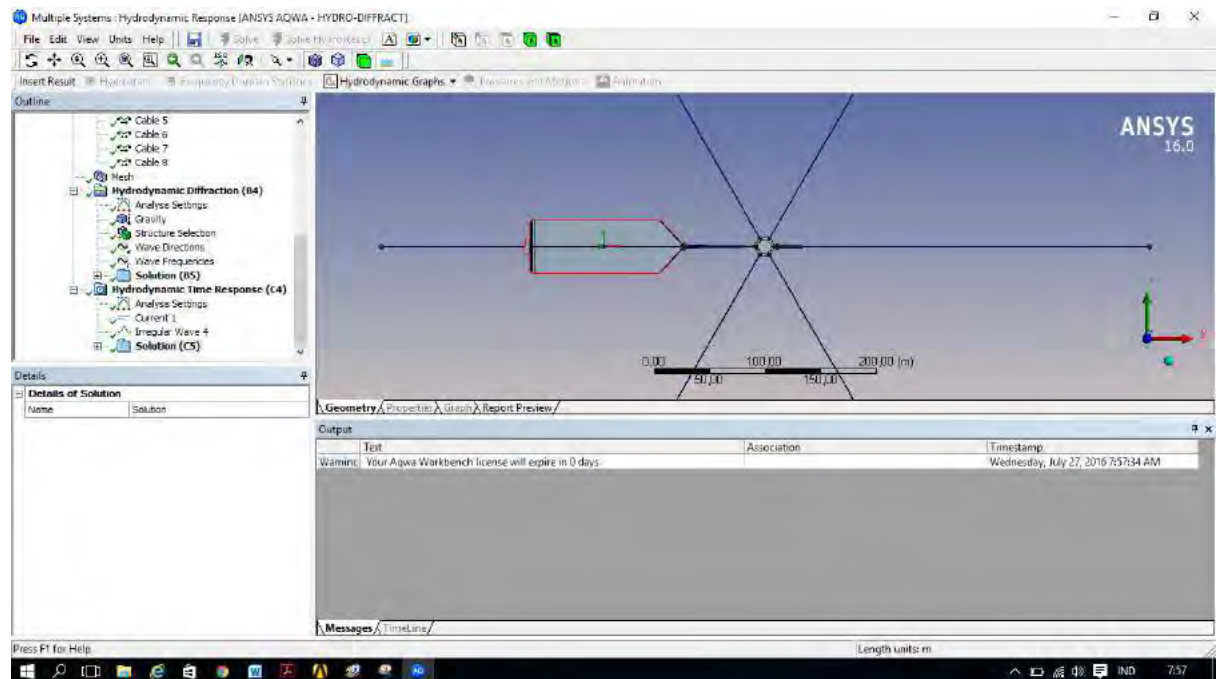
RAO SPM 3 *surge* tertinggi ialah sebesar 1.100 m/m) yaitu pada *heading* 180°, *sway* tertinggi pada *heading* 90° sebesar 1.006 (m/m), dan *heave* mempunyai nilai maksimum yang sama dari masing-masing *heading* sebesar 2.216 (m/m). Untuk gerak osilasi rotasional *roll* maksimum pada *heading* 90° sebesar 7.393 (deg/m), *pitch* maksimum sebesar 7.393 (deg/m) pada *heading* 180°, dan *yaw* mendekati 0.

Tension pada Mooring Line kondisi muatan FSO Arco Ardjuna light load

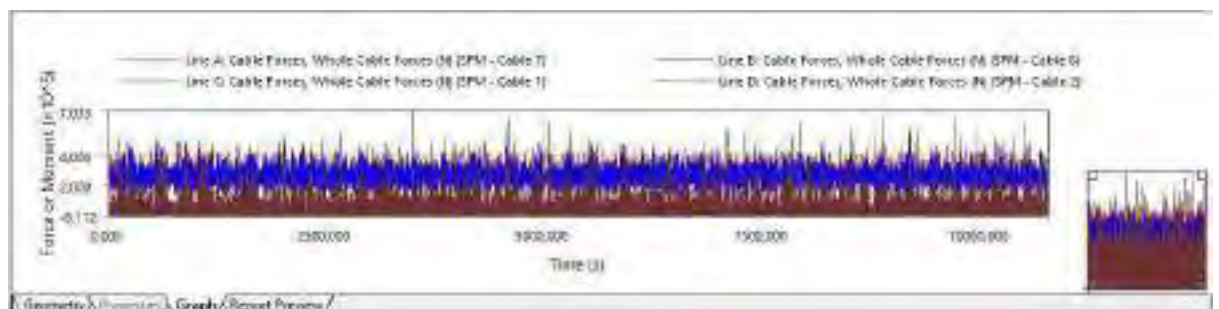
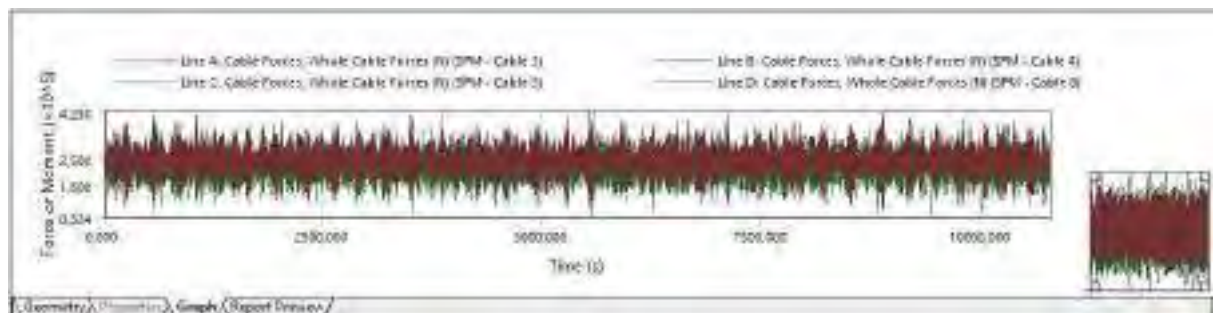
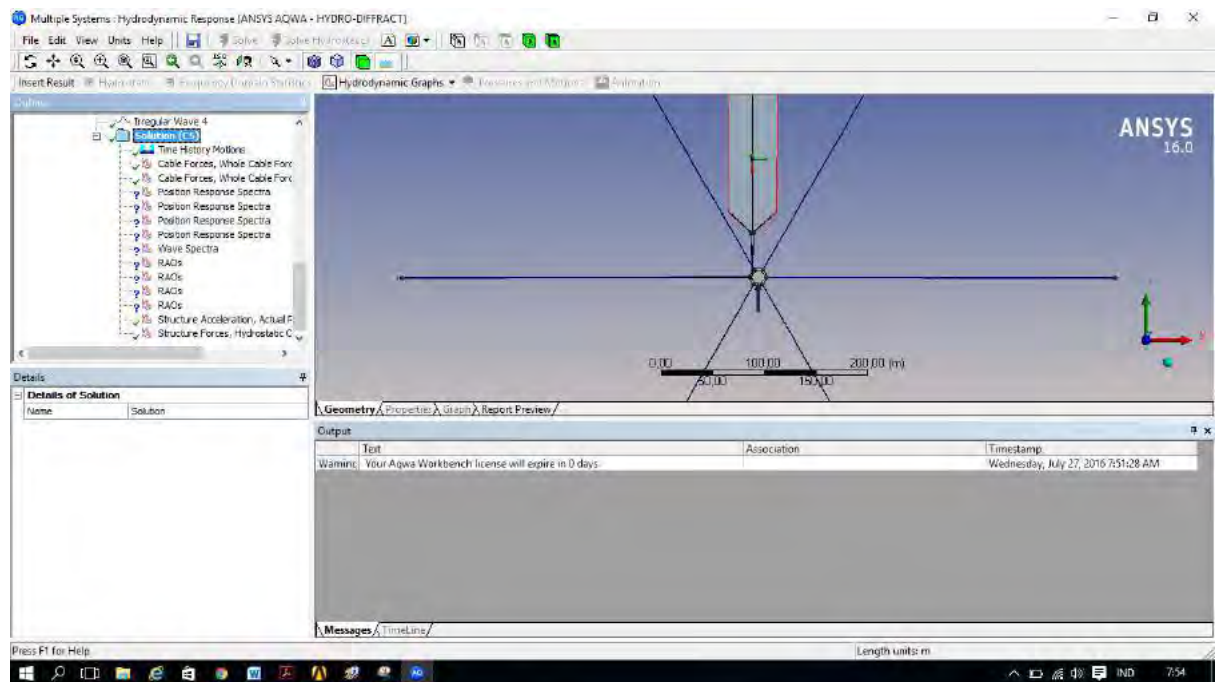


Tension pada Mooring Line kondisi muatan FSO Arco Ardjuna full load

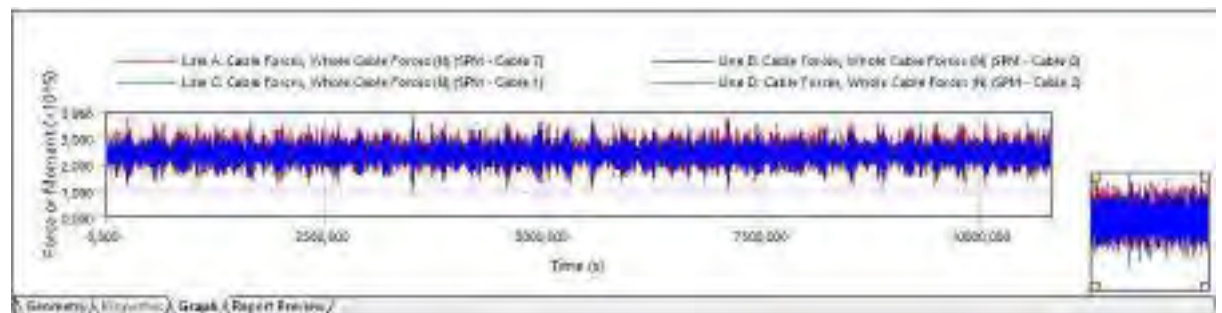
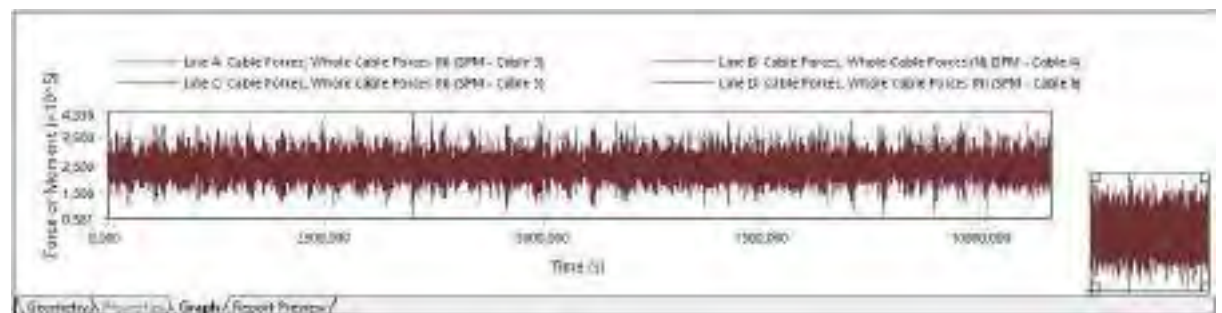
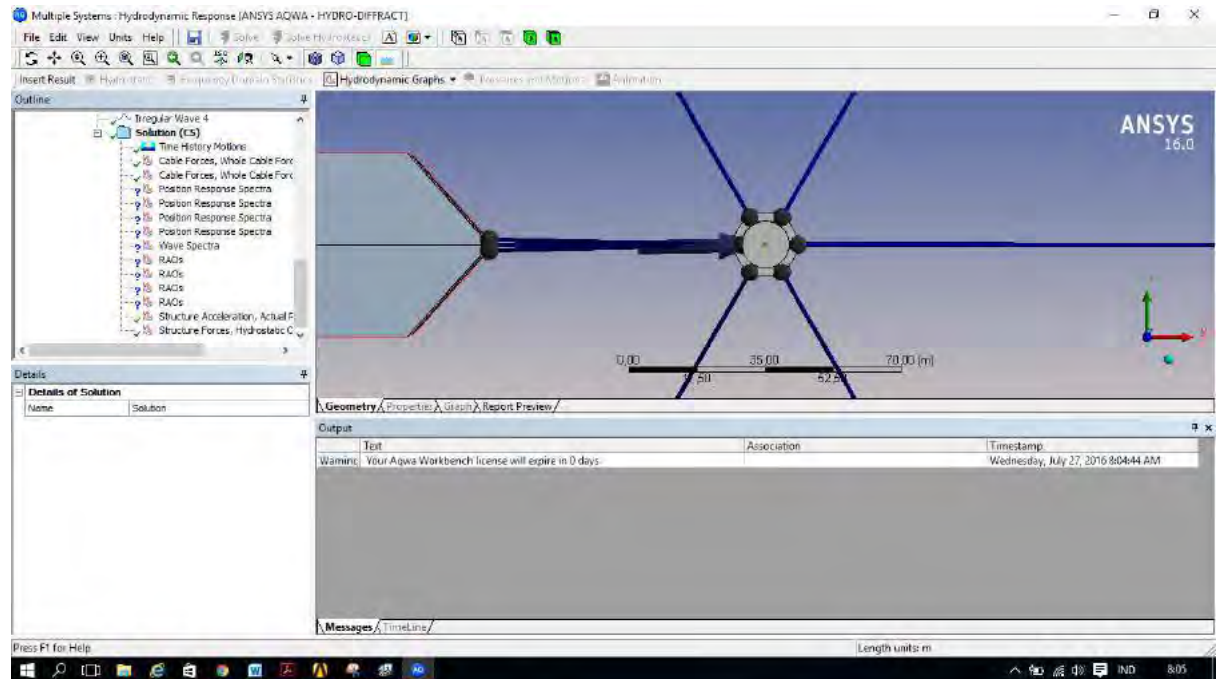
Heading 0°



Heading 90°



Heading 180°



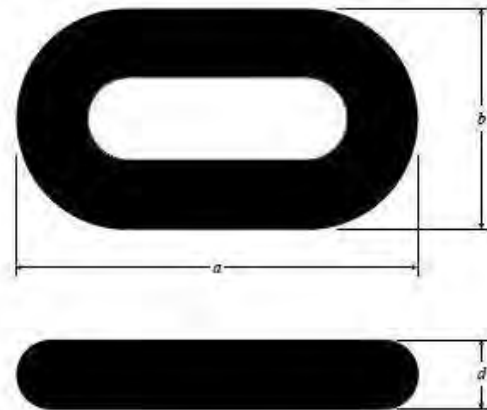
LAMPIRAN C
Mooring System (ORCAFLEX)

PERMODELAN ANCHOR CHAIN LOKAL

Penulis memodelkan *chain* menggunakan *software* AutoCAD 2014 dengan mengikuti prosedur desain ABS *Certification of Mooring Chain*.

Proportions, Dimensions and Tolerances of Studless Common Link

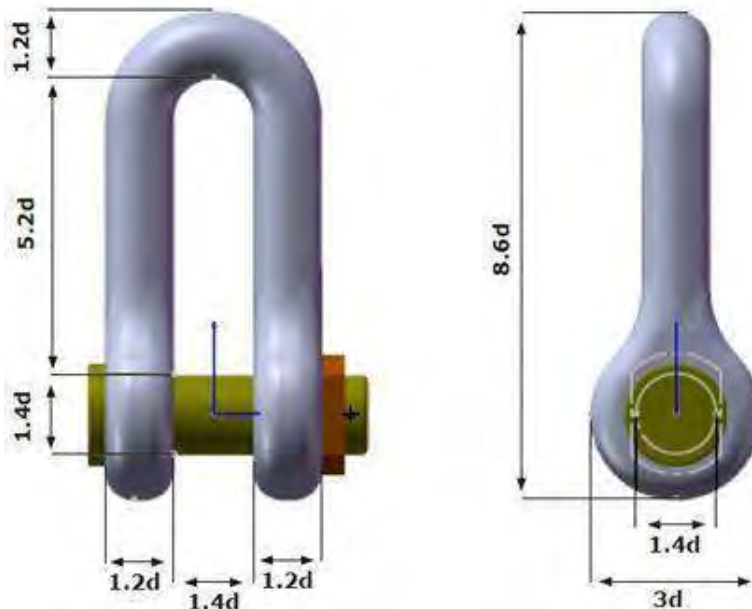
The internal link radii (R) and external radii should be uniform.



Designation ⁽¹⁾	Description	Nominal Dimension of the Link	Minus Tolerance	Plus Tolerance
a	Link Length	$6d$	$0.15d$	$0.15d$
b	Link Width	$3.35d$	$0.09d$	$0.09d$
R	Inner Radius	$0.65d$	0	---

Notes:

- 1 Dimension designation is shown in above figure.
 d = nominal diameter of chain
- 2 Other dimension ratios are subject to special approval.

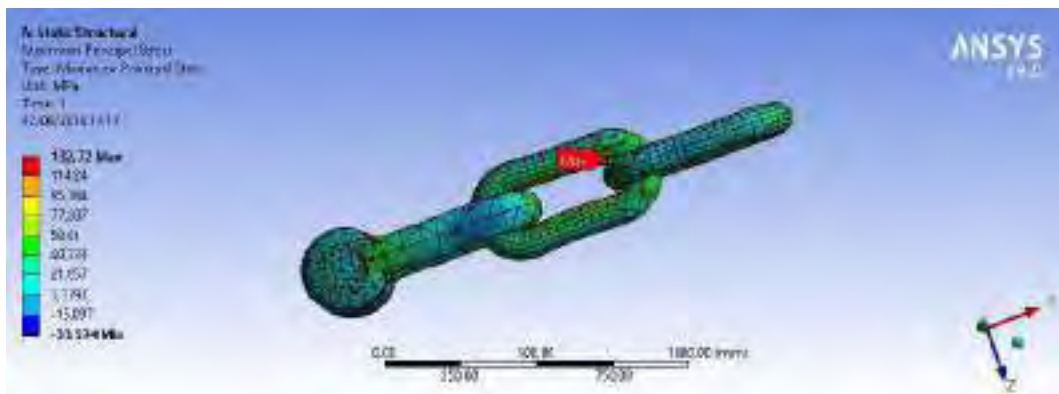


Chain yang digunakan merupakan *chain* dengan tipe *Studless Link*, grades R3 dengan *Minimum Breaking Load* (MBL) 7051 kN setelah mengalami korosi. Dengan diameter 102 mm berdasarkan data perusahaan. Pada ABS dijelaskan bahwa, dalam

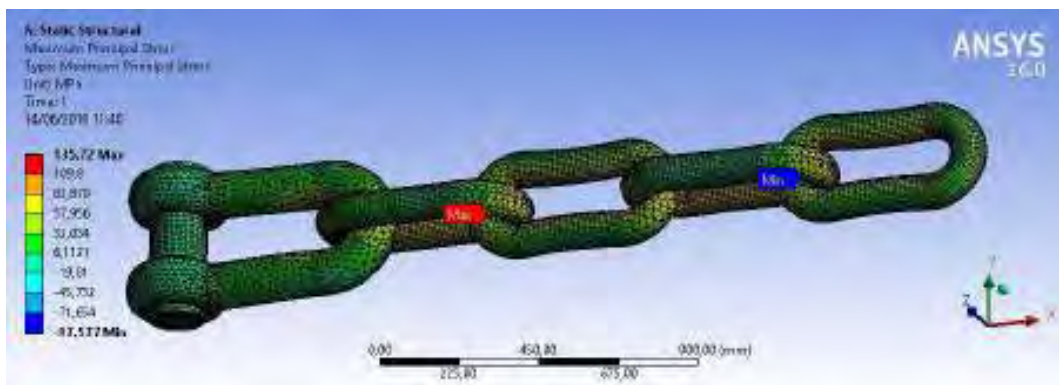
15 phatom konfigurasi anchor chain memiliki panjang 27,5 m, dimana penulis memodelkan *anchor chain* melalui software Ansys Mechanical hanya 4 meter dari 350m ukuran panjang keseluruhan.

ANALISIS PERBANDINGAN UKURAN CHAIN

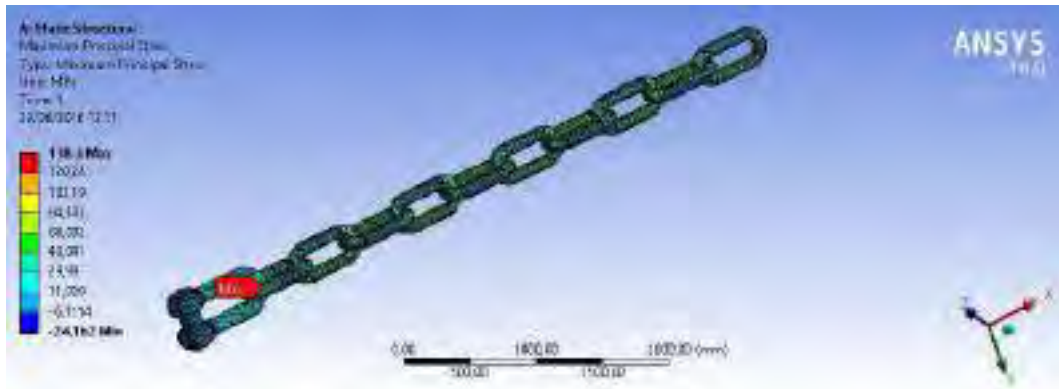
Penulis memodelkan *chain* menjadi 3 model, dengan 2 mata rantai, 4 mata rantai dan 8 mata rantai, dengan masing-masing model memiliki satu *shackle*. Lalu penulis melaksanakan prosedur meshing dan pembebanan sesuai dengan BAB IV. Analisis dan Pembahasan, lalu menganalisis perbandingan besar tegangan yang terjadi pada masing-masing model anchor chain yang telah dibuat. Tampak seperti dibawah ini.



Permodelan dengan 1 shackle dan 2 mata rantai, didapatkan besar tegangan adalah 132,72 Mpa.



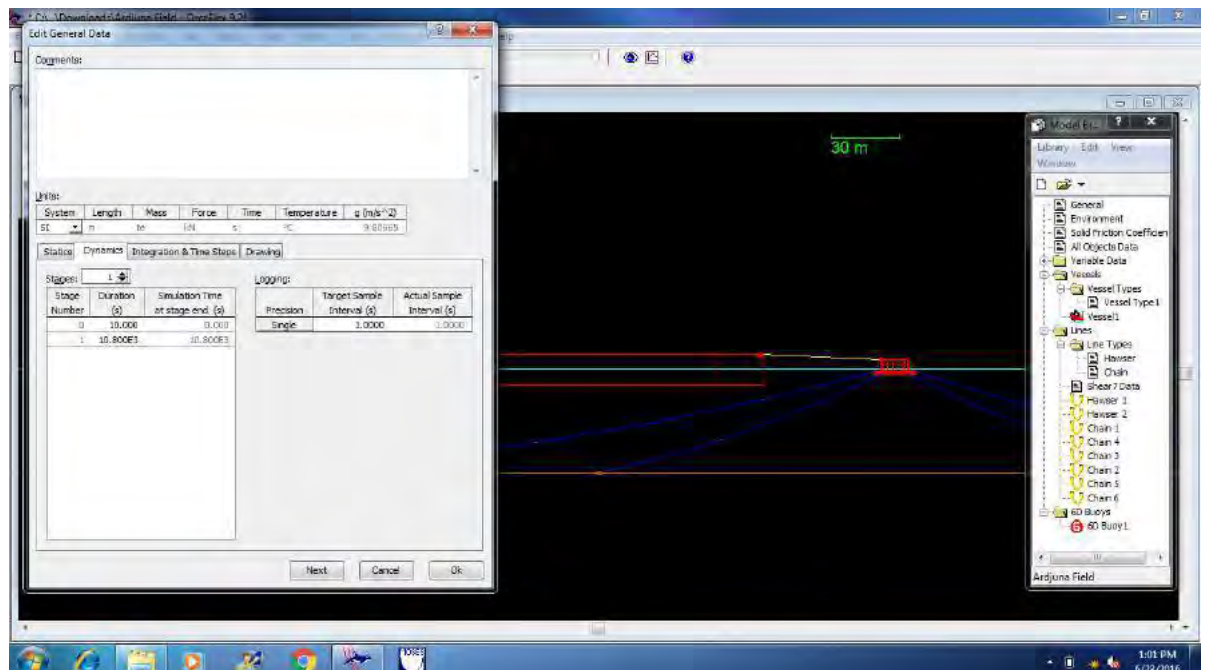
Permodelan dengan 1 shackle dan 4 mata rantai, didapatkan besar tegangan adalah 135,72 Mpa.



Permodelan dengan 1 shackle dan 8 mata rantai menunjukkan besar tegangan maksimum yang diterima adalah 138,3 Mpa.

Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan walaupun perubahan besar tegangan yang terjadi tidak besar, namun model dengan 4 mata chain tidak mampu mewakili keseluruhan chain dengan baik. Karena keterbatasan aplikasi permodelan yang dimiliki penulis. Namun penulis menggunakan software Orcaflex untuk mengetahui letak tegangan terbesar pada *chain* dengan memodelkan seluruh chain sepanjang 350 meter dengan membagi segment menjadi 7, dan masing-masing panjang segment adalah 50 meter.

PERMODELAN ANCHOR CHAIN (ORCAFLEX)

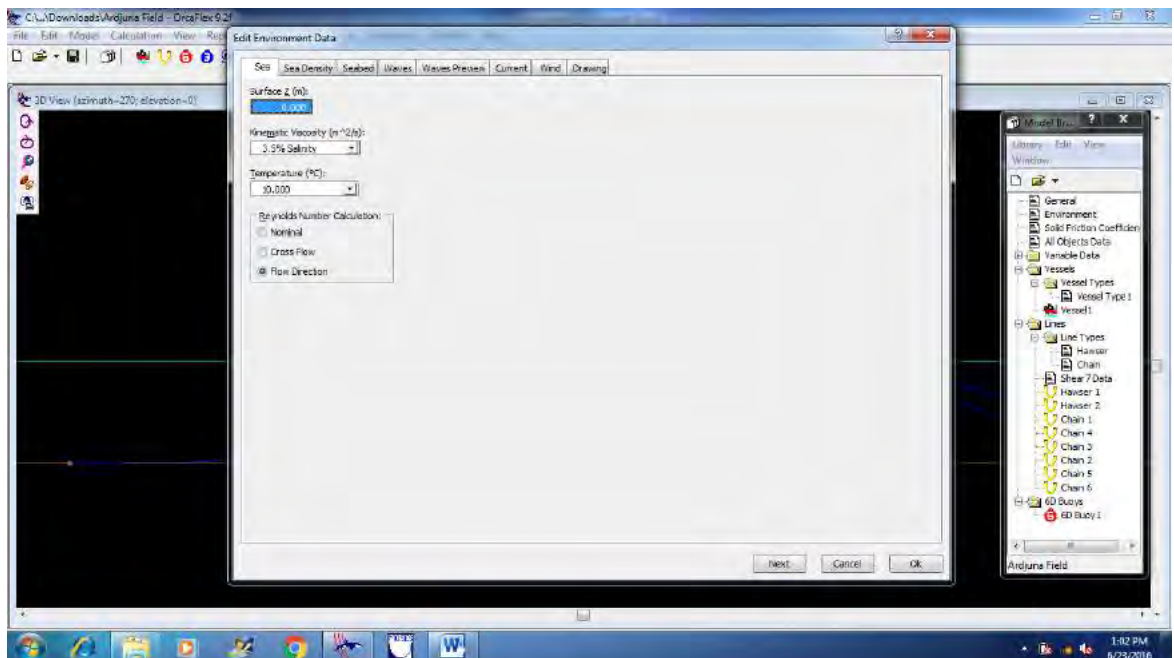


- Mengatur waktu yang akan digunakan untuk analisis dengan *time domain analysis*

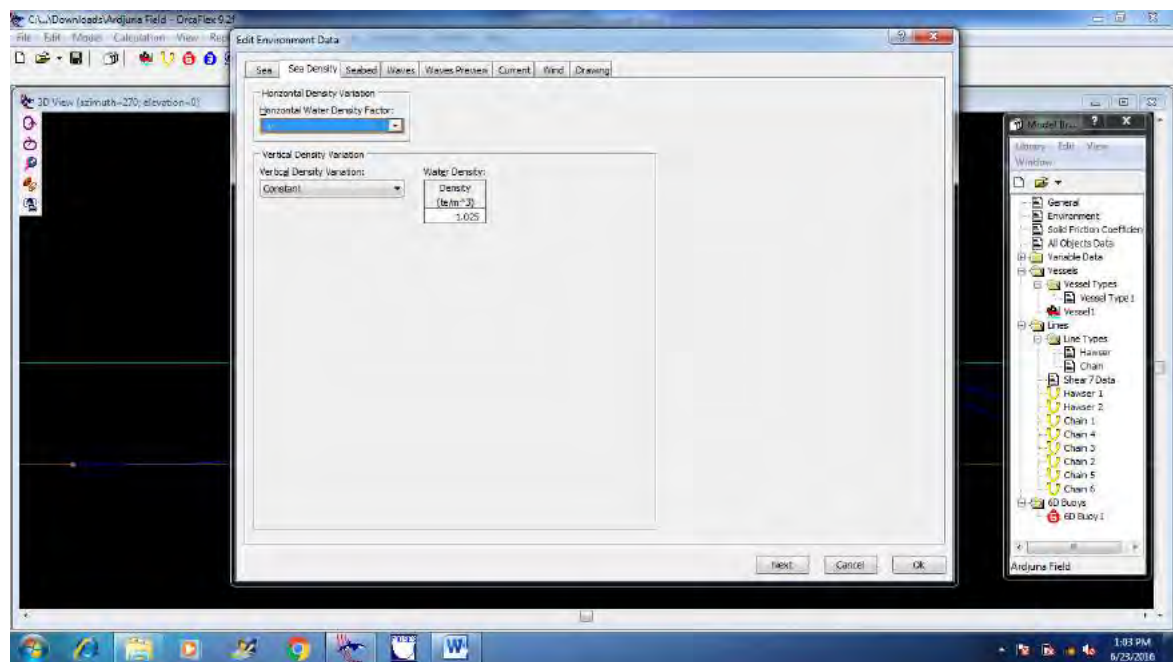
Catatan :

Menurut *API RP 2T*, terdapat 2 metode analisis simulasi domain dalam analisis dinamis struktur lepas pantai, yaitu:

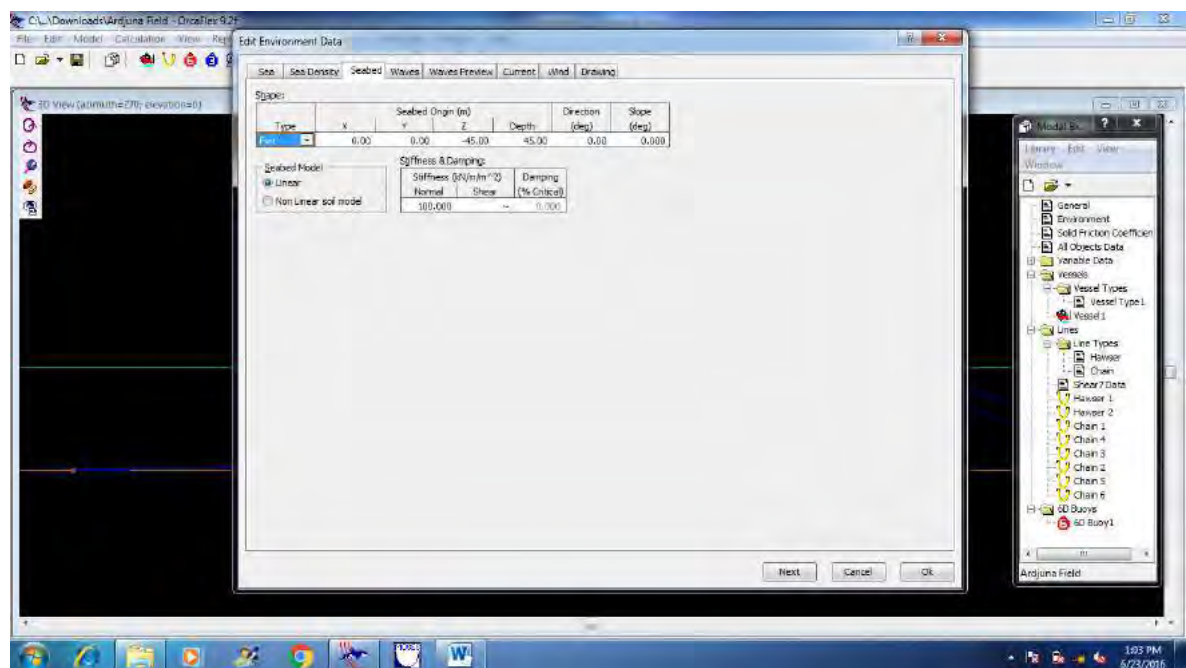
- Frequency domain analysis* adalah simulasi kejadian pada saat tertentu dengan interval frekuensi yang telah ditentukan sebelumnya. *Frequency domain* juga dapat digunakan untuk memperkirakan respon gelombang acak termasuk gerakan dan percepatan struktur, gaya tendon dan sudut. Keuntungannya adalah lebih menghemat waktu perhitungan dan juga input atau output lebih sering digunakan oleh perancang. Namun juga terdapat kekurangan dalam metode ini, yaitu semua persamaan *nonlinear* harus diubah dalam bentuk *linear*.
- Time domain analysis* adalah penyelesaian gerakan dinamis struktur berdasarkan fungsi waktu. Pendekatan yang dilakukan dalam metode ini menggunakan prosedur integrasi waktu dan akan menghasilkan *time history response* berdasarkan fungsi waktu $x(t)$. Keuntungan dari metode *time domain* dibanding metode *frequency domain* adalah semua tipe *non-linear* (matrik sistem dan beban-beban eksternal) dapat dimodelkan dengan lebih tepat. Kerugiannya adalah memerlukan waktu menghitung yang lebih banyak, seperti periode simulasi memerlukan waktu panjang. Simulasi *time domain* dapat dikerjakan menurut beberapa skema integrasi. Untuk dapat mewakili kondisi sebenarnya, simulasi minimal dilakukan selama 3 jam (DNV-OS-E301, 2004).



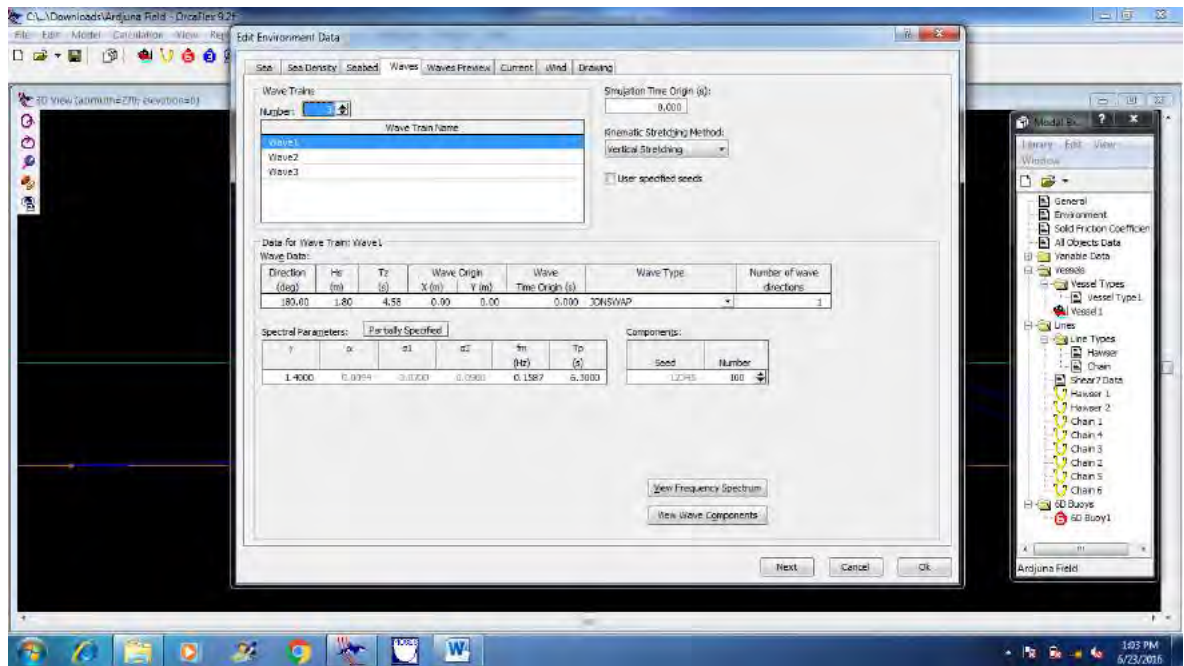
- Memasukkan data lingkungan yang akan digunakan untuk analisis



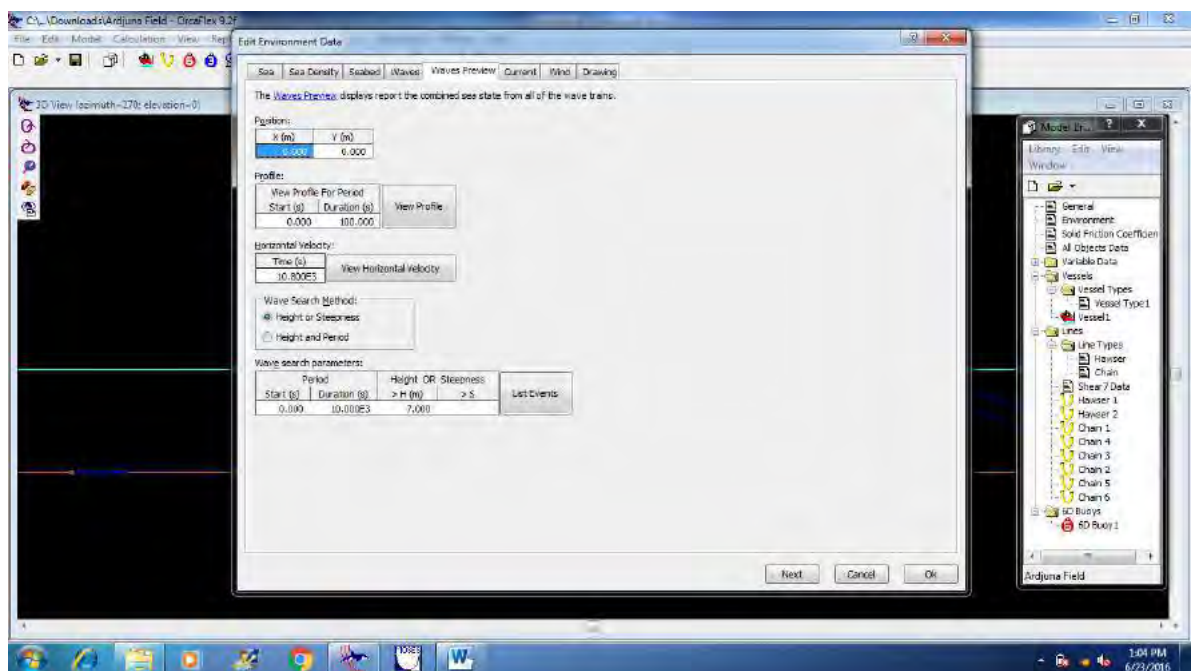
- *Sea Density*

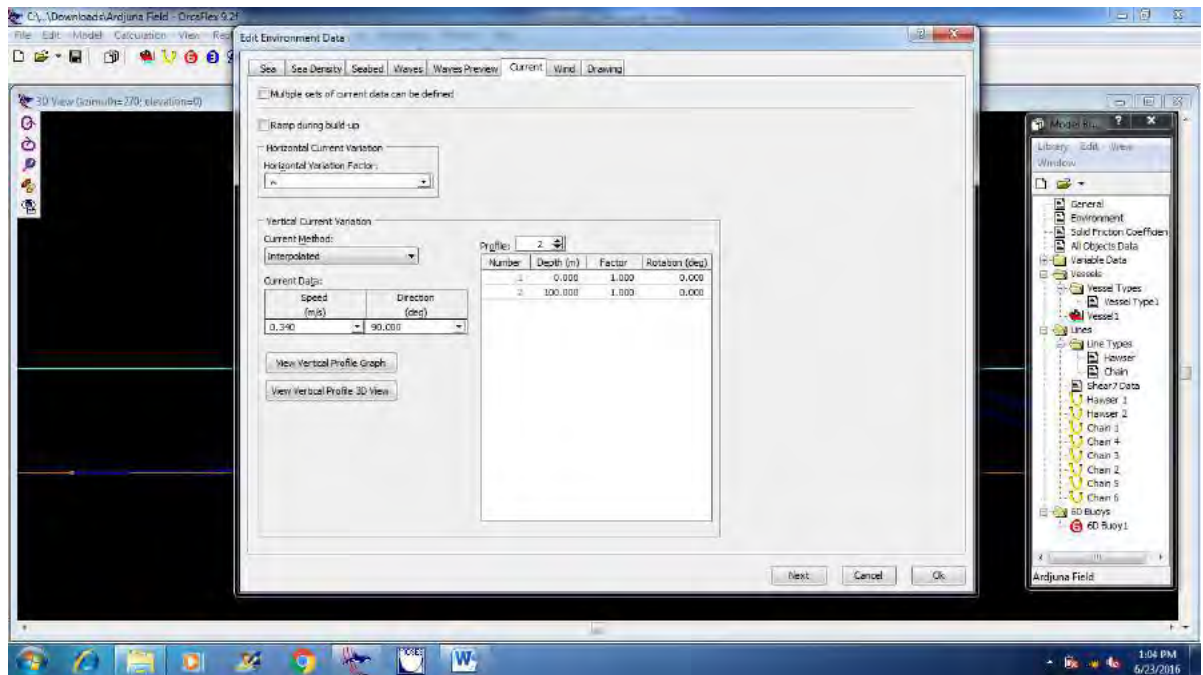


- Kedalaman perairan lokasi operasi struktur yang akan dianalisis

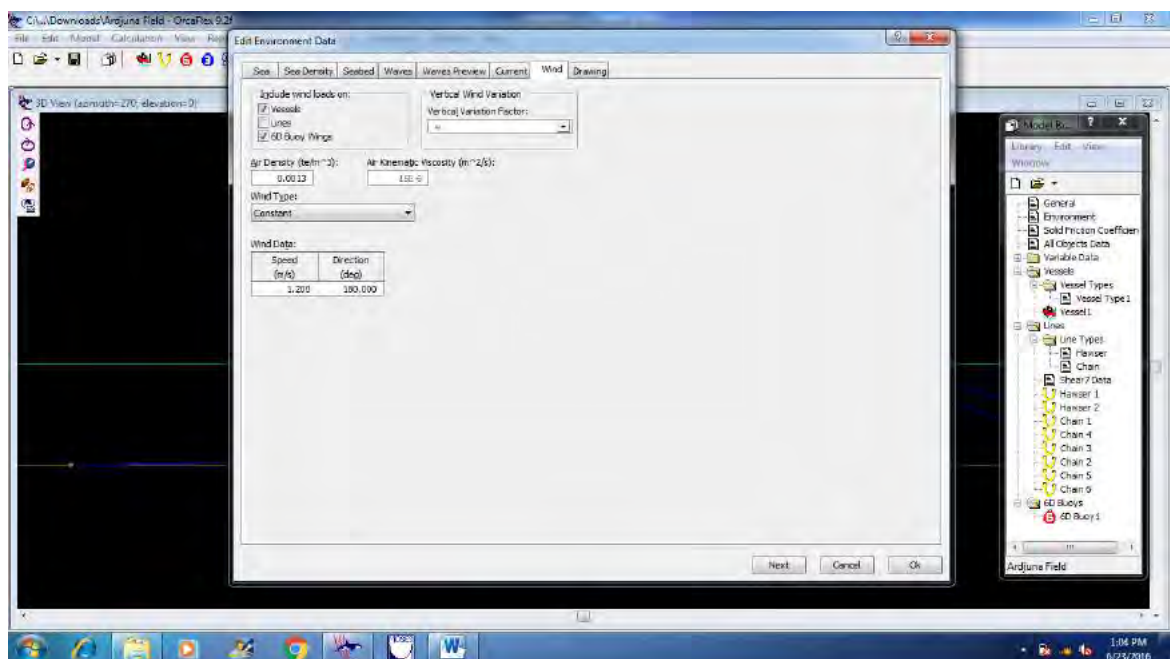


- Memasukkan data gelombang yang akan digunakan untuk analisis, arah datang gelombang, tinggi signifikan dan periode

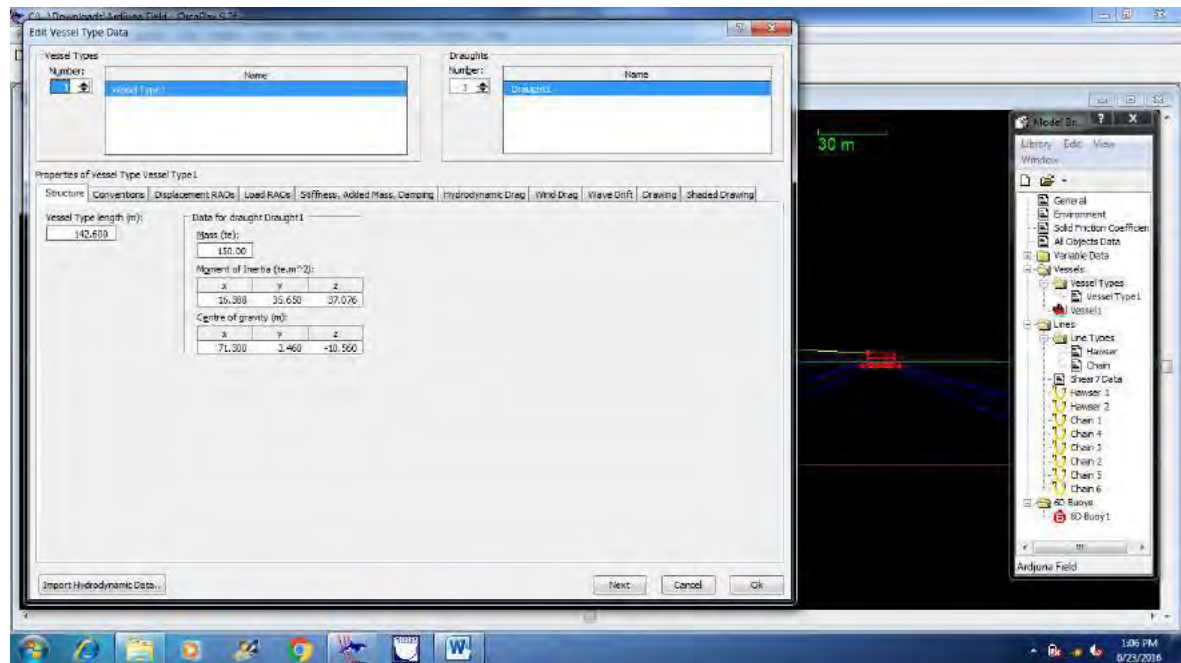




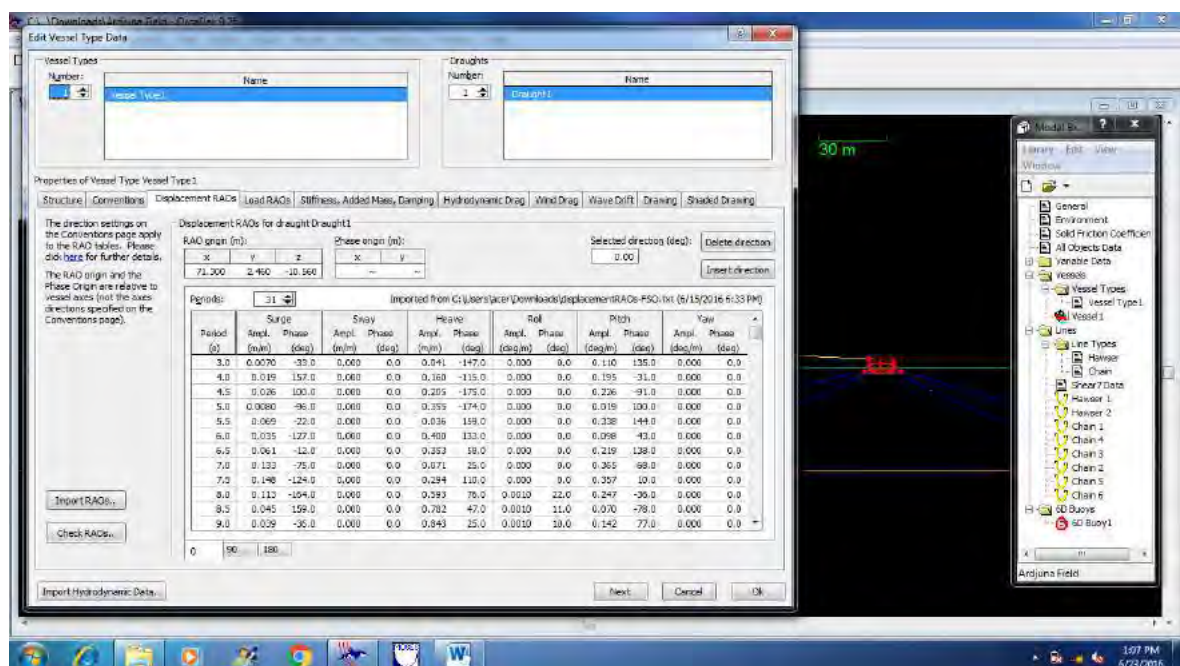
- Memasukkan beban arus sesuai dengan data yang didapatkan dari perusahaan



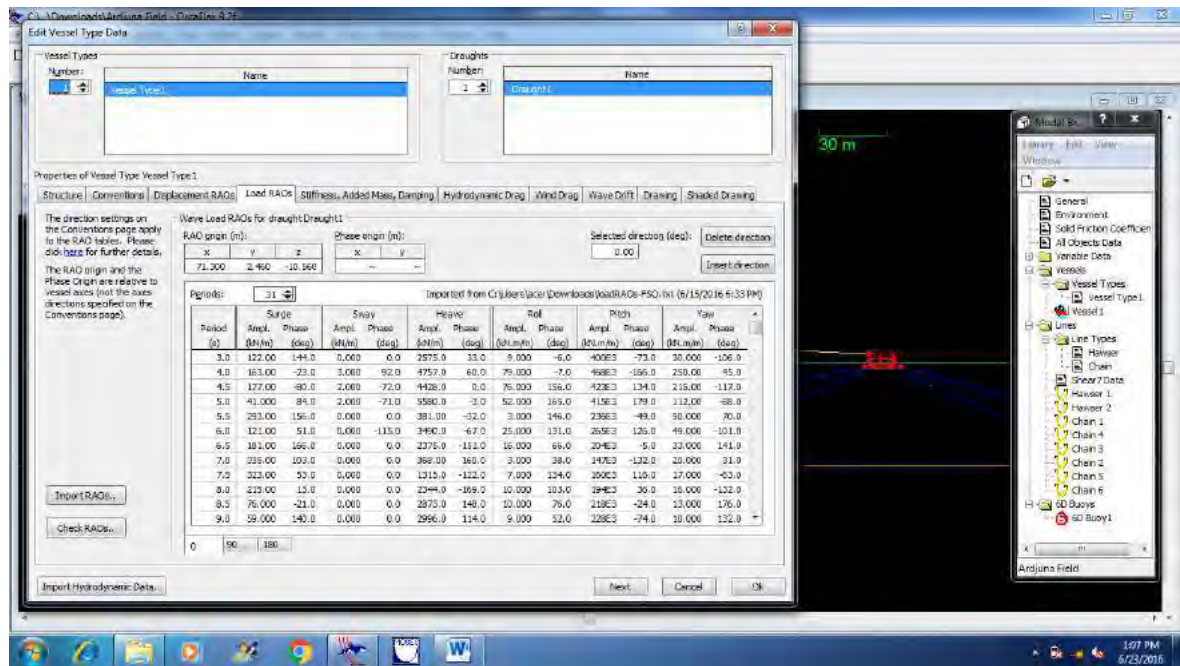
- Memasukkan beban angin



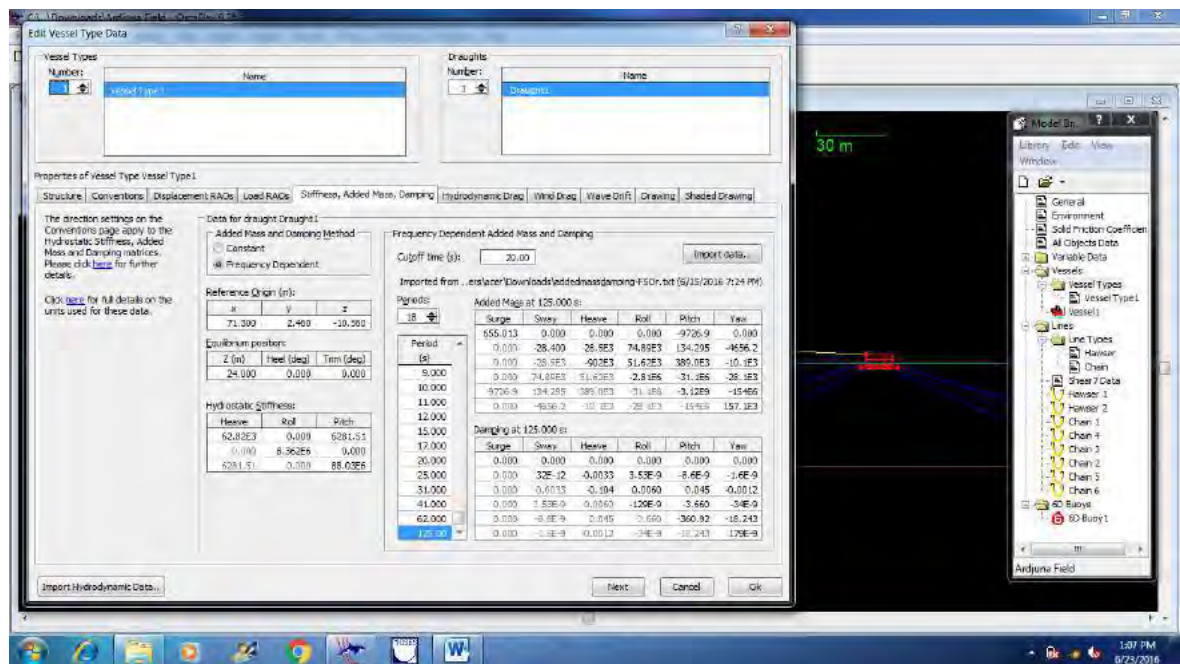
- Menginput Data Struktur



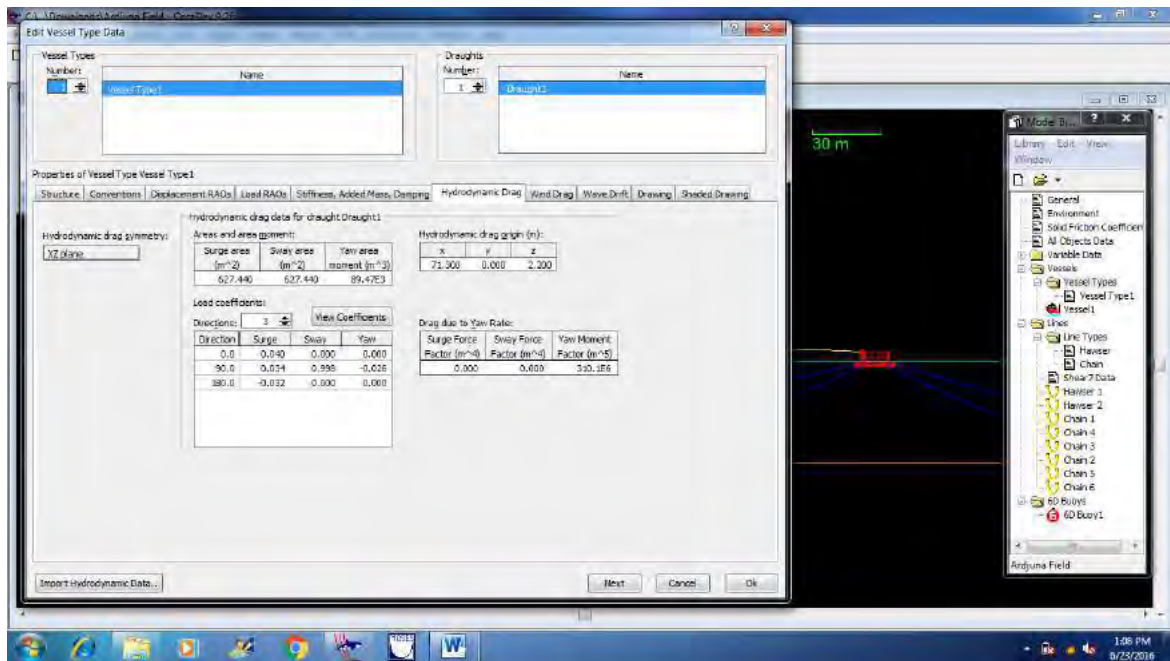
- Menginput data hidrostatik dan RAO Free Floating yang didapat dari keluaran MOSES



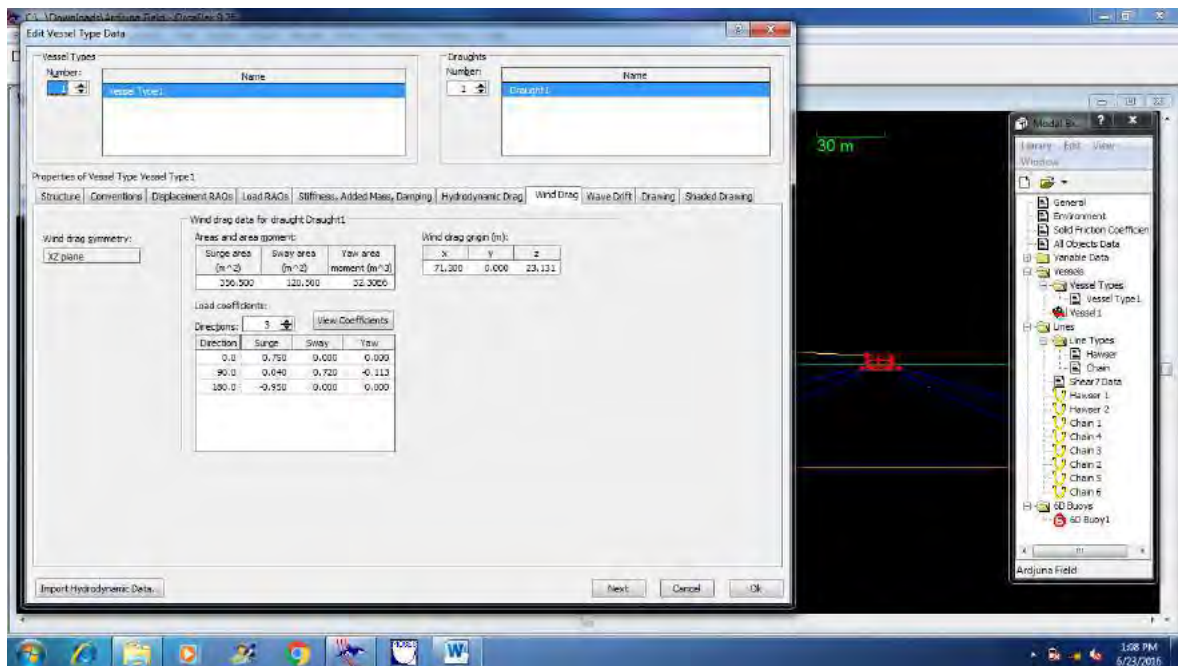
- Memasukkan data RAO Free Floating yang didapat dari luaran MOSES



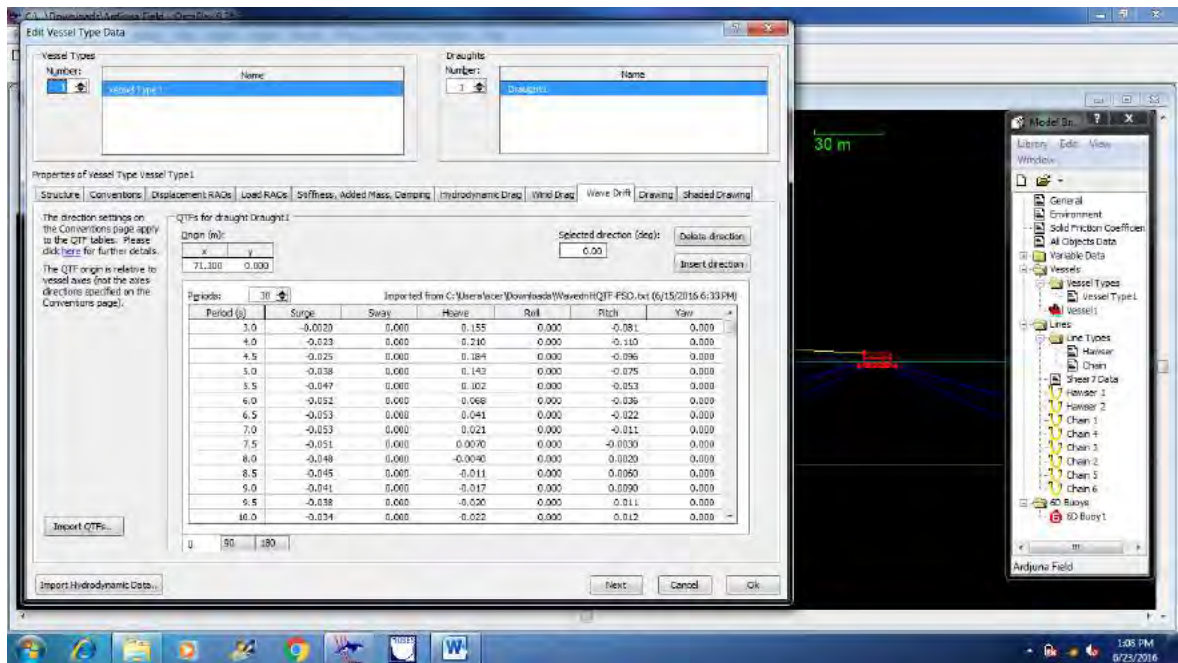
- Memasukkan data added mass



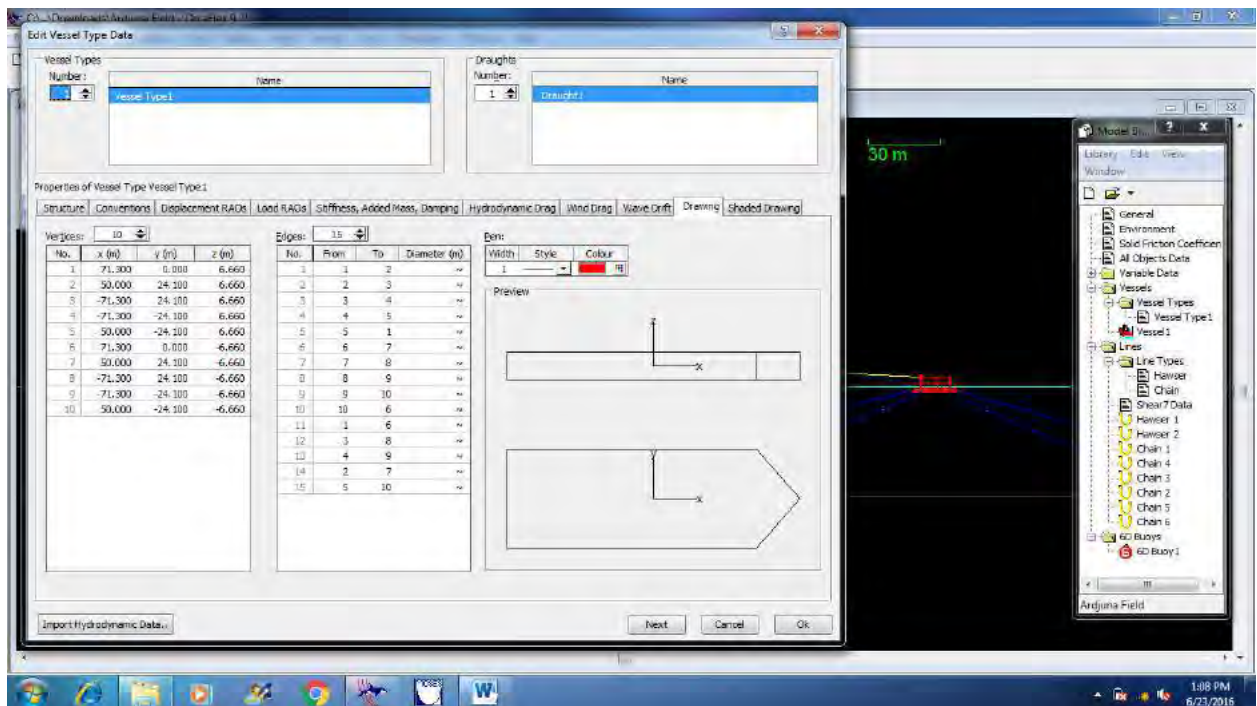
- Data hydrodynamic drag



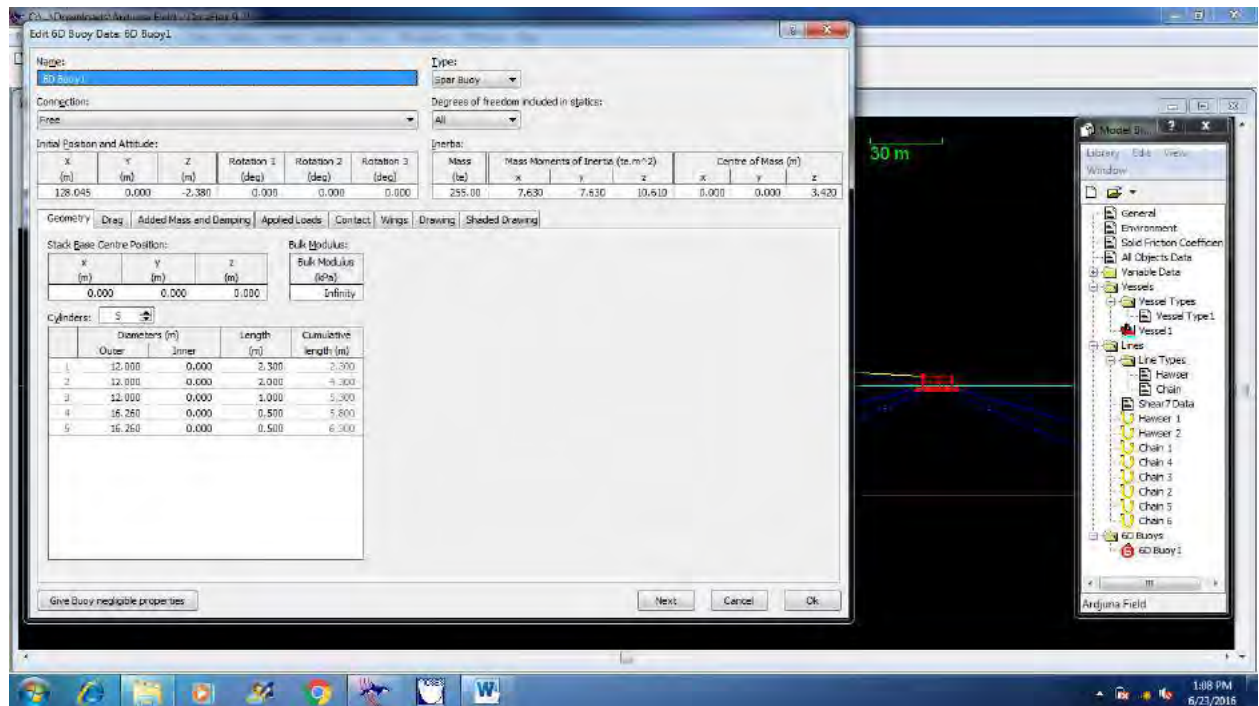
- Memasukkan data Wind Drag



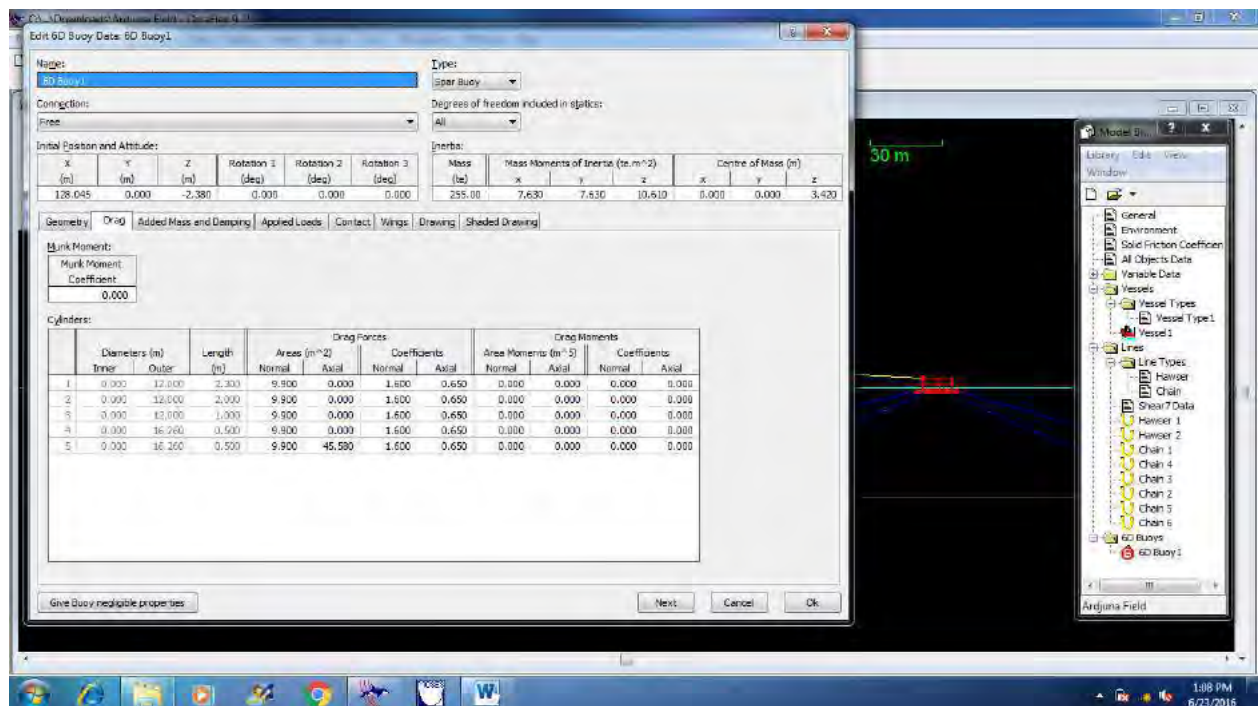
- Memasukkan data wave drift

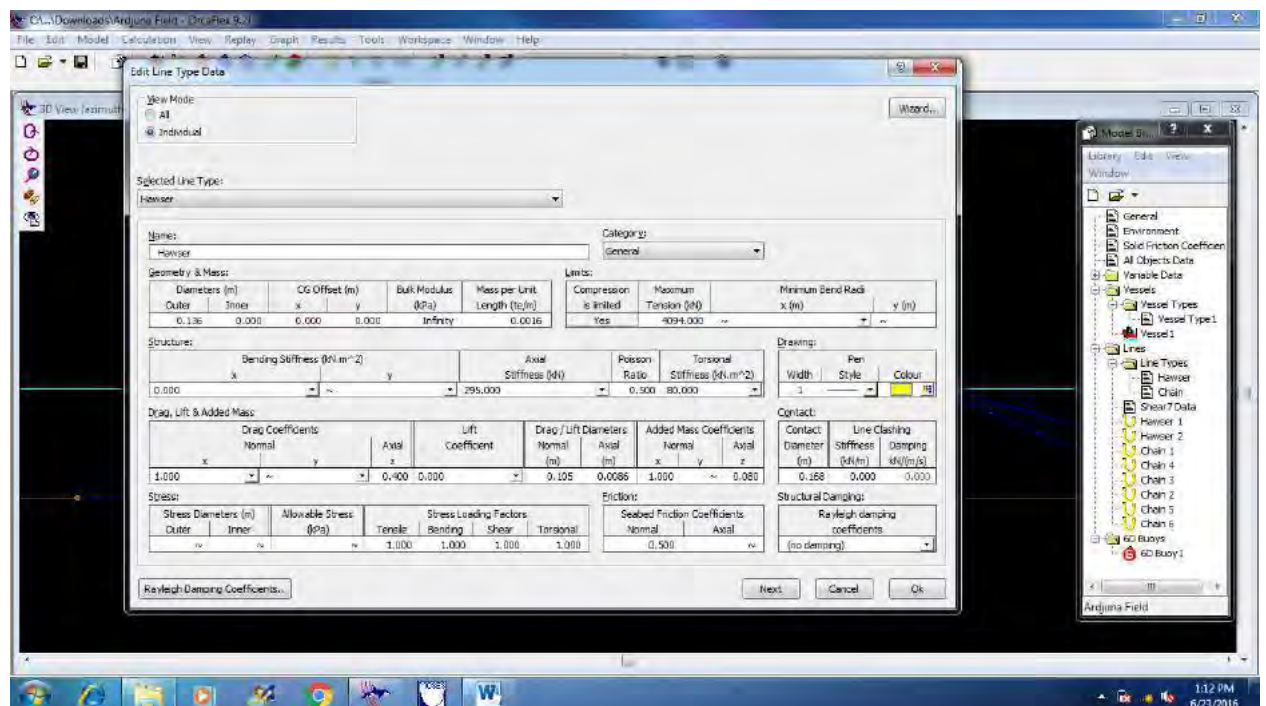
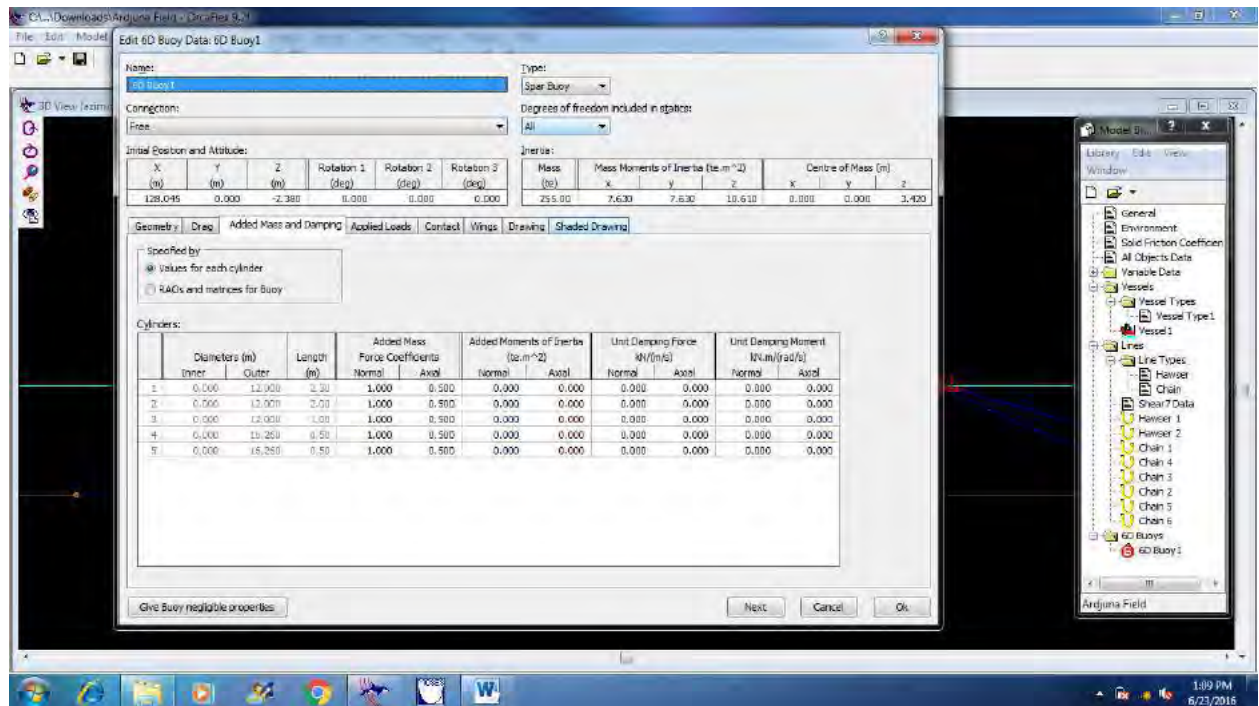


- Memasukkan data pricipal dimension kapal berdasarkan data yang didapat dari perusahaan.

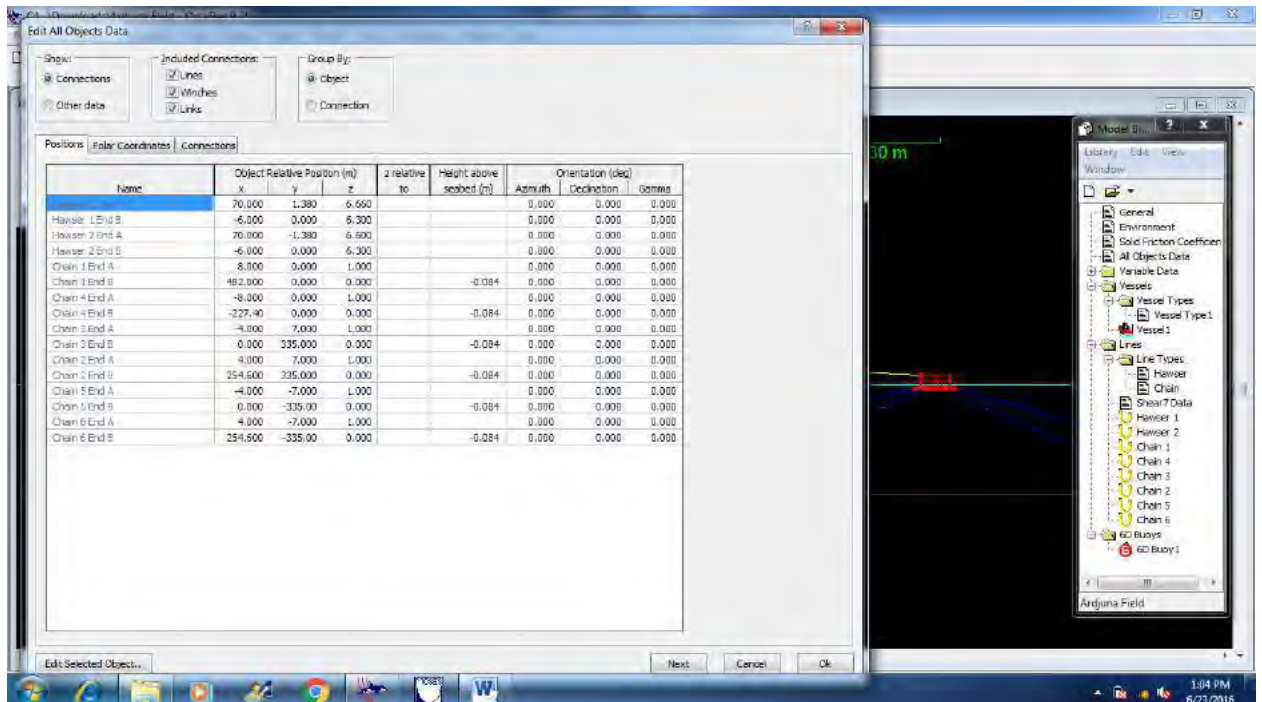
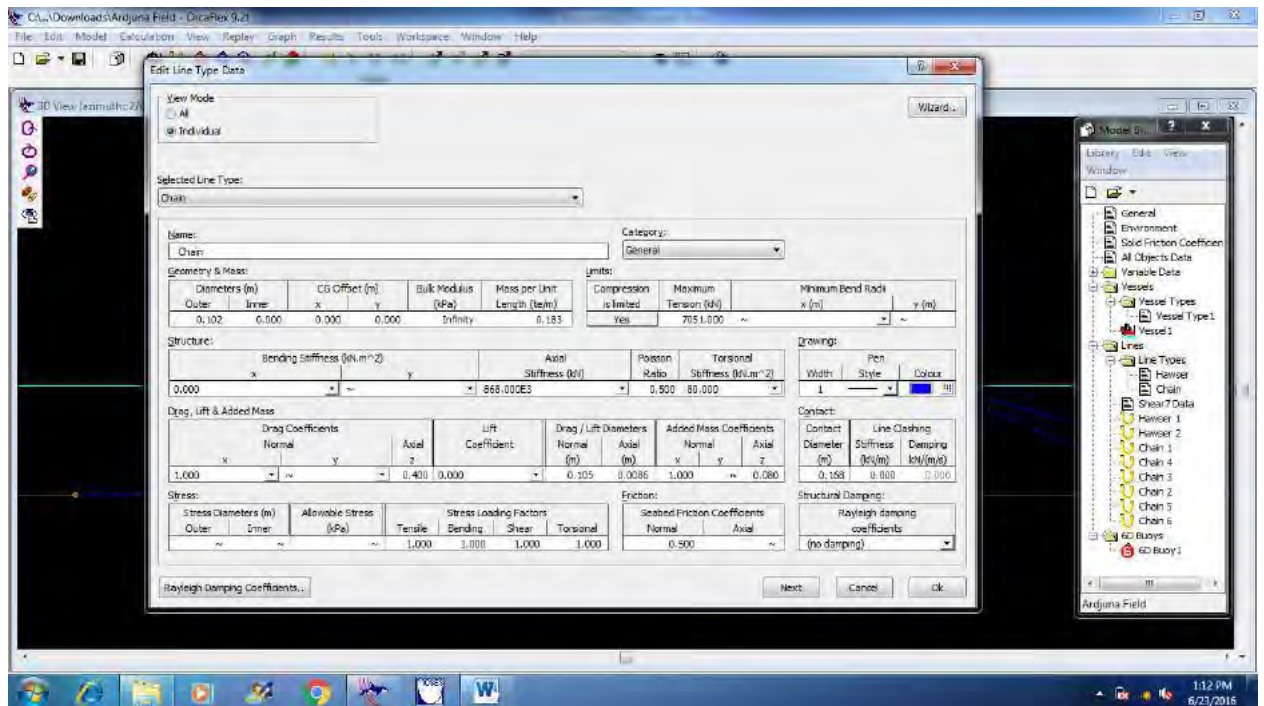


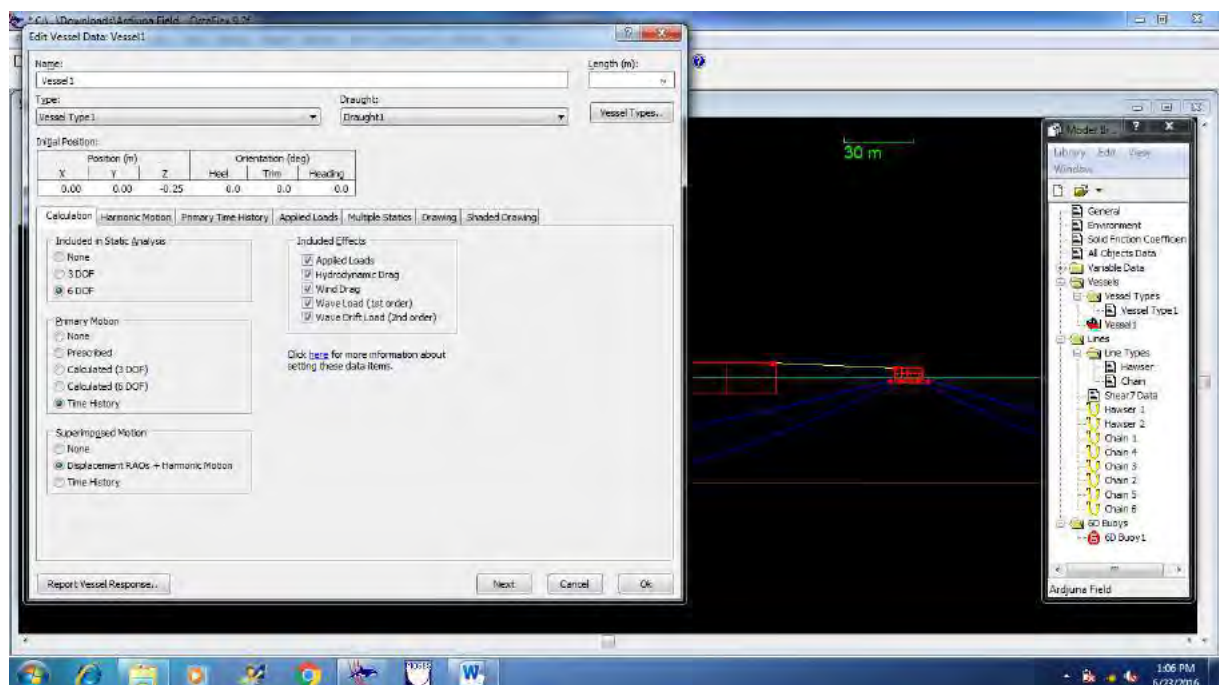
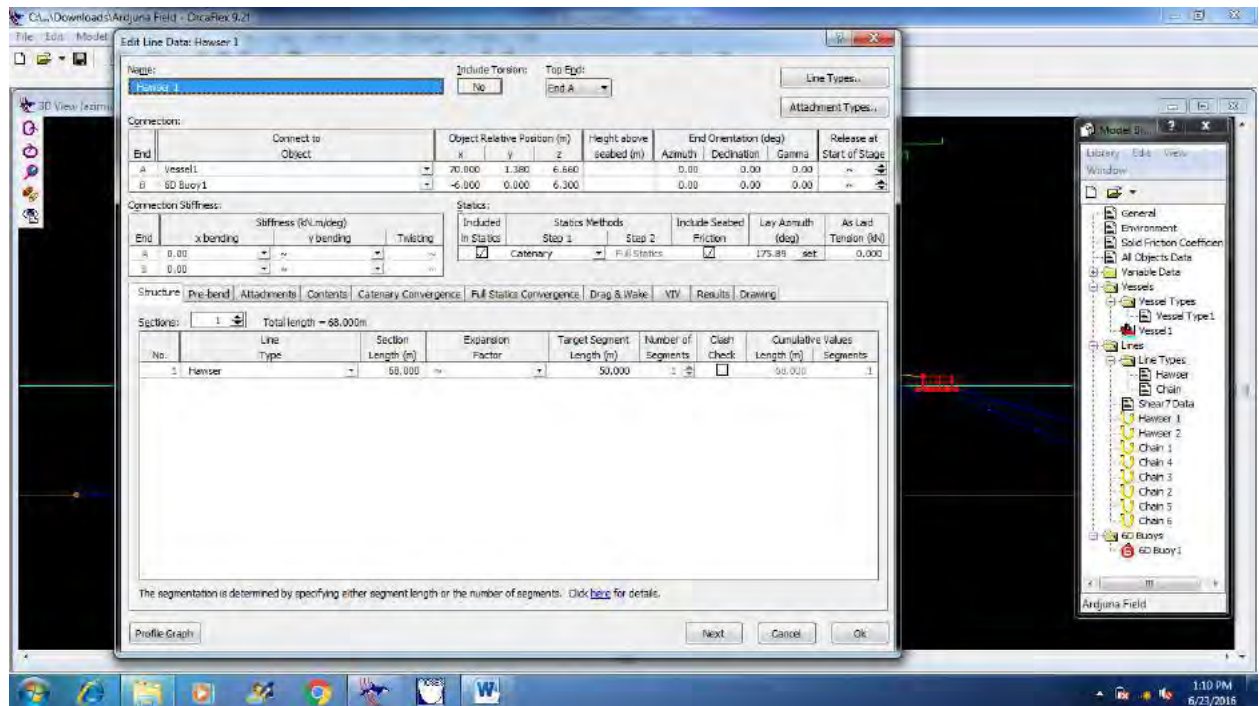
- Membuat model buoy

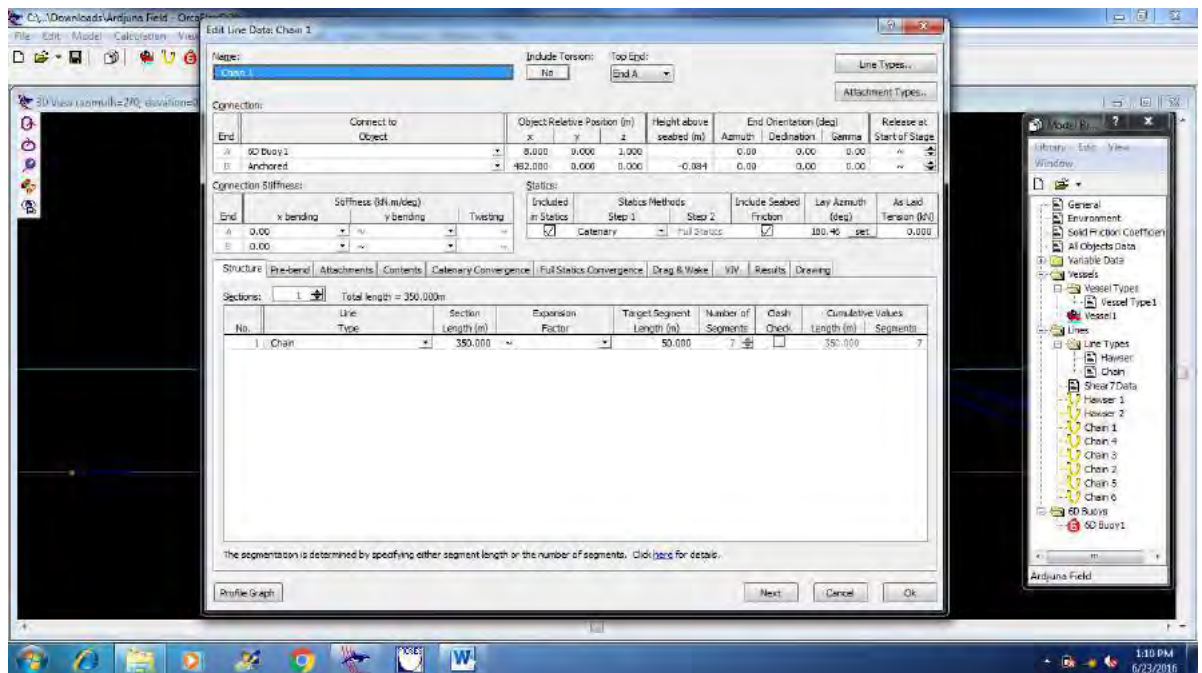
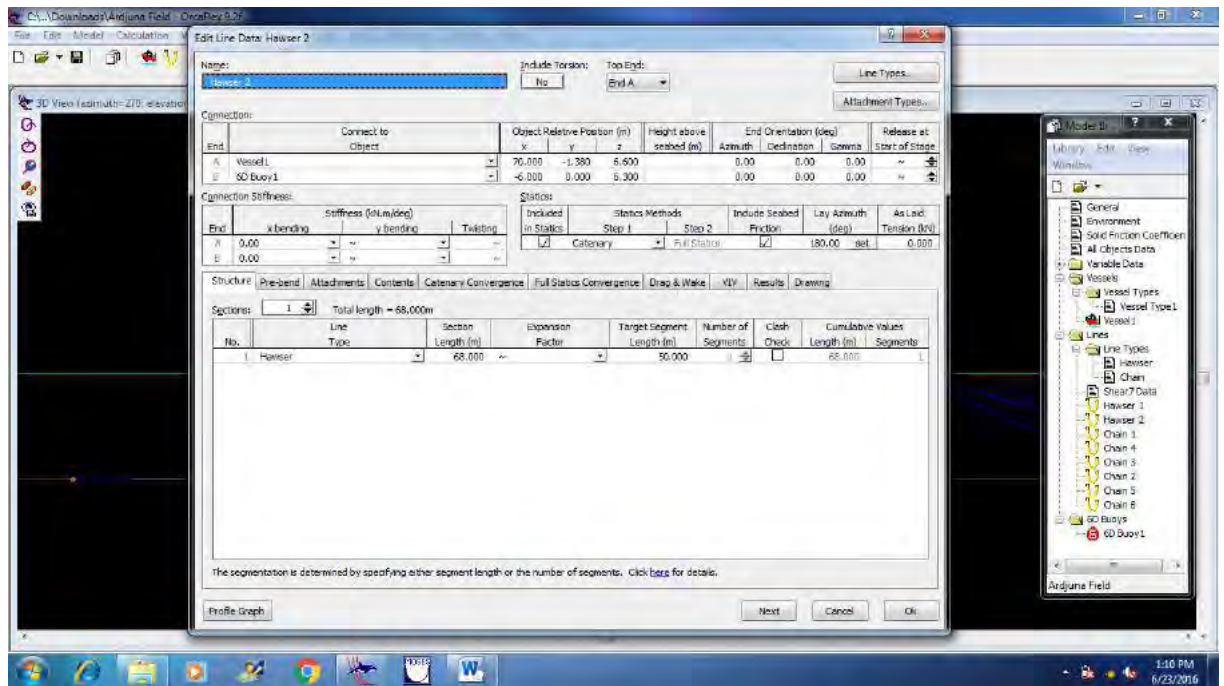




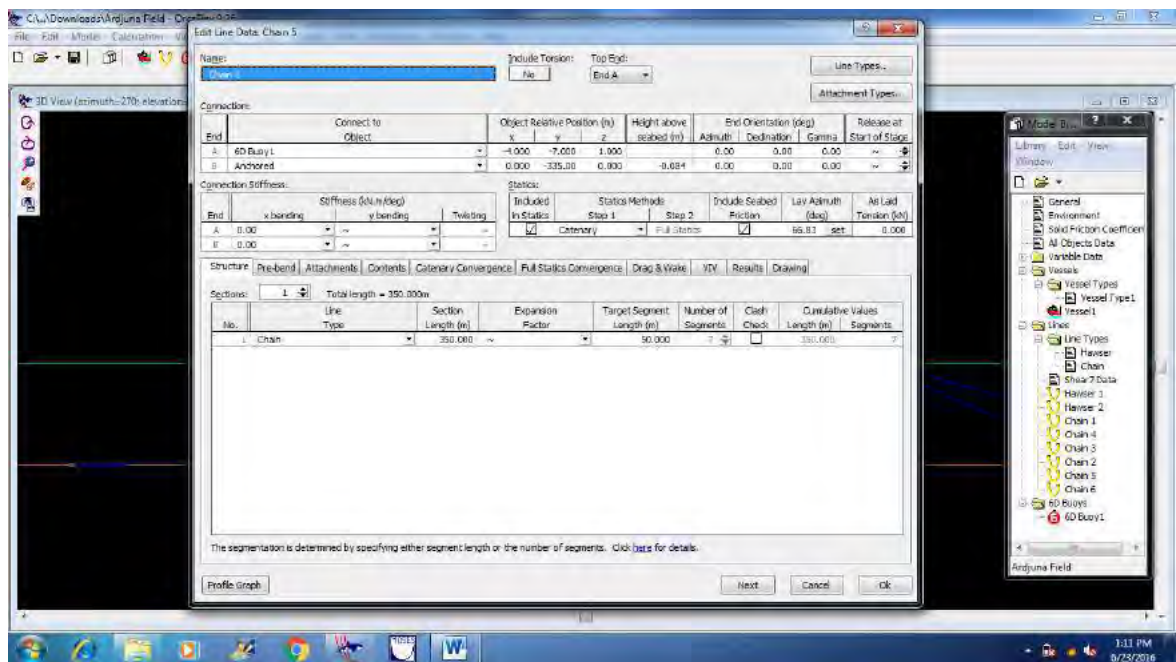
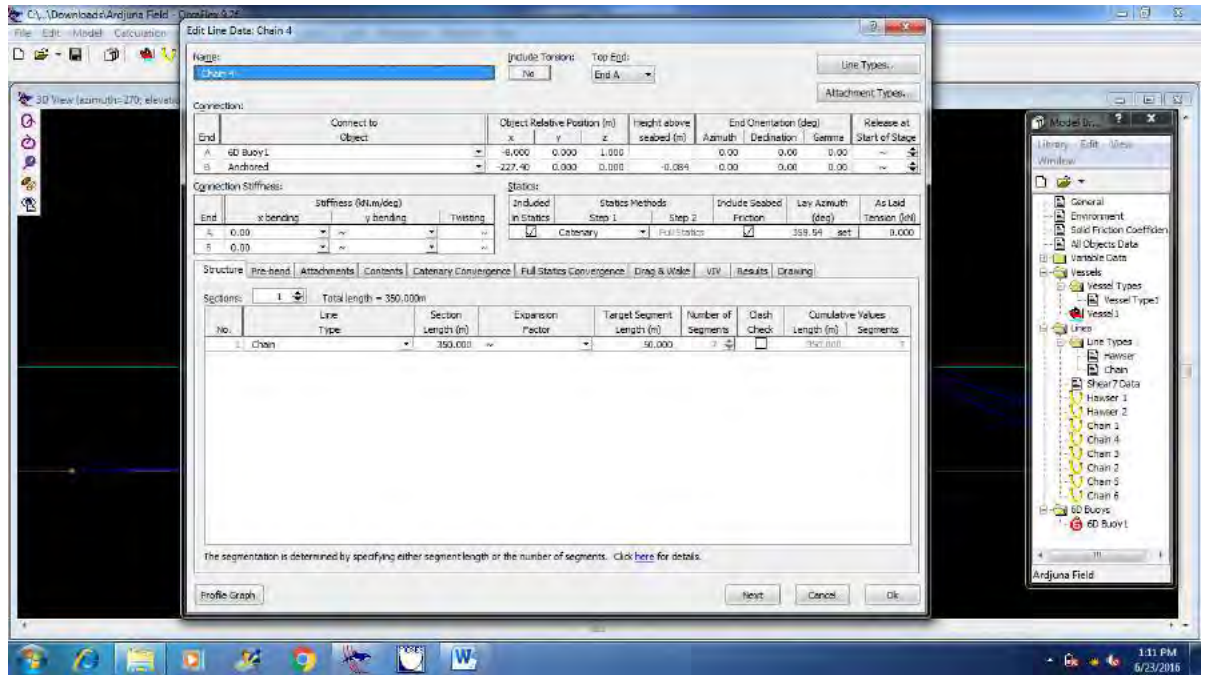
- Membuat konfigurasi Connection Line

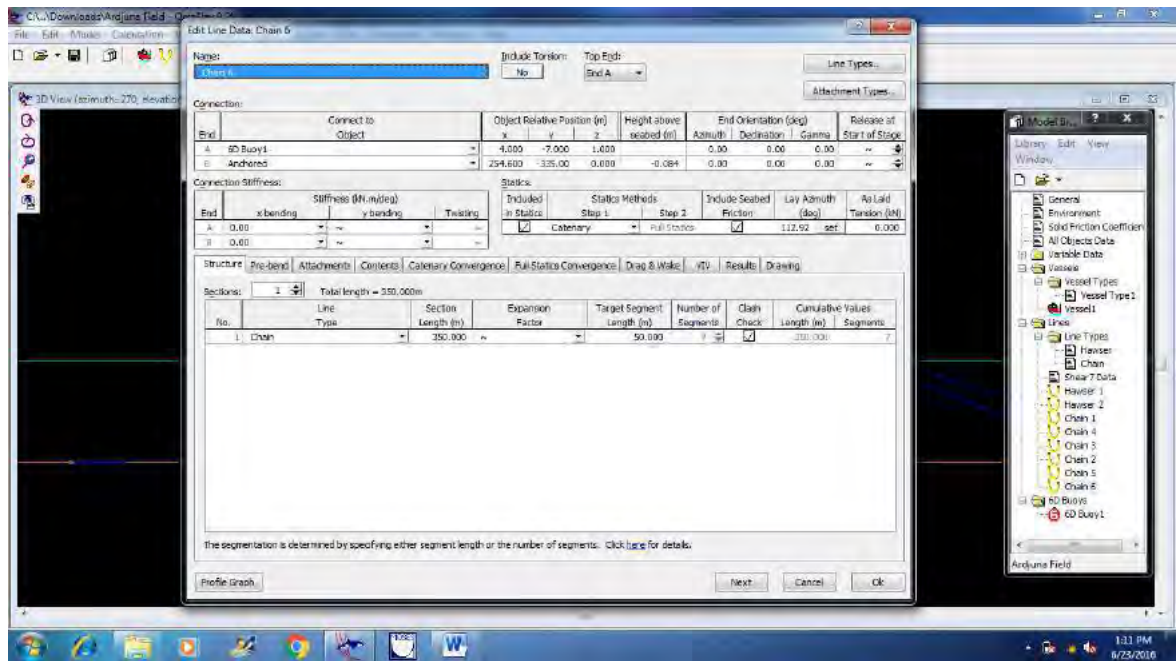




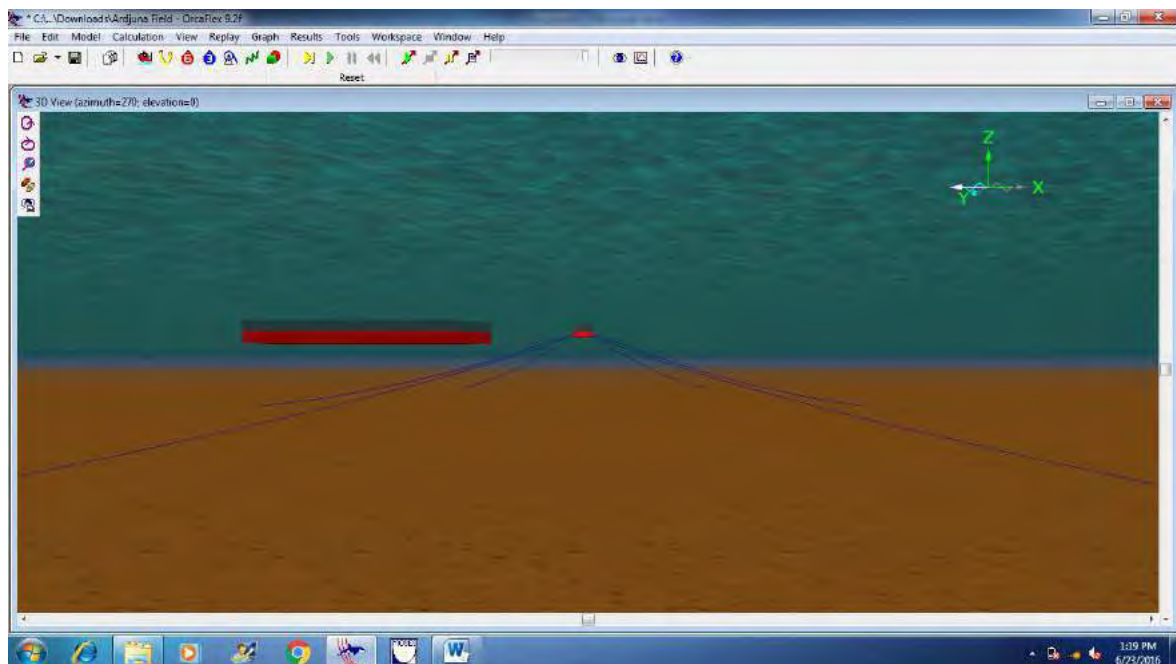








PERMODELAN KONFIGURASI TAMBAT PADA ORCAFLEX





Simulasi pada Orcaflex dilakukan selama 10800 detik dan setiap *tension* pada *mooring line* harus memenuhi *safety factor* yang diijinkan menurut ABS yaitu pada *mooring line* harus lebih dari 1,67. *Safety factor* didapat dari membagi MBL(*Manimum Breaking Load*) dengan *tension* maksimum yang didapat dari *software Orcaflex*.

***Effective Tension* luaran ORCAFLEX**

CHAIN 1

Mid-Segment Loads; * indicates seabed contact								
Segment	Arc Length (m)	Effective Tension (kN)	Shear Force (kN)	Bend Radius (m)	Curvature (rad/m)	Bend Moment (kN.m)	Wall Tension (kN)	Max von Mises Stress (kPa)
1	25	684.1098248	0	2240.907371	0.0004462	0	683.2003052	13863.0596
2	75	667.0012909	0	1174.658593	0.0008513	0	665.1738494	12769.32048
3	125	652.9331506	0	1219.473338	0.00082	0	650.3592078	1257.664132
4	175	641.5475077	0	1009.696169	0.0009904	0	638.3926655	124654.2913
5	225	633.98942	0	881.752651	0.0011341	0	630.4557957	123729.334
6	275	630.8614165	0	1581.624432	0.0006323	0	627.1816192	123346.5295
7 *	325	633.0027112	0	12355.87532	8.09E-05	0	629.3067091	123608.5807

CHAIN 2

Mid-Segment Loads; * indicates seabed contact								
Segment	Arc Length (m)	Effective Tension (kN)	Shear Force (kN)	Bend Radius (m)	Curvature (rad/m)	Bend Moment (kN.m)	Wall Tension (kN)	Max von Mises Stress (kPa)
1	25	586.9485527	0	797.0542584	8.54E-05	0	586.2598915	117509.0336
2	75	572.2068571	0	739.1343111	0.000174242	0	570.9474467	115704.9477
3	125	568.504879	0	562.9734967	0.000197512	0	566.7103476	114028.1022
4	175	556.0752926	0	463.4243681	0.000213519	0	553.7861697	112506.9717
5	225	555.0569903	0	411.4180097	0.000203607	0	552.3171854	111158.554
6	275	545.4258117	0	410.1186795	0.000184566	0	542.2772326	109979.8922
7	325	537.1079385	0	401.1786992	8.55E-05	0	533.5884911	108961.9525

CHAIN 3

Mid-Segment Loads; * indicates seabed contact								
Segment	Arc Length (m)	Effective Tension (kN)	Shear Force (kN)	Bend Radius (m)	Curvature (rad/m)	Bend Moment (kN.m)	Wall Tension (kN)	Max von Mises Stress (kPa)
1	25	572.2842984	0	790.8261	0.000122387	0	569.60322	115427.1166
2	75	565.6073171	0	785.8819	0.000264139	0	565.33272	114753.3302
3	125	564.6312462	0	535.6722	0.000232252	0	563.81718	114287.7009
4	175	564.0711934	0	531.3483	0.000175397	0	561.76534	113995.3636
5	225	554.3258633	0	522.4538	0.000207794	0	551.56415	110802.732
6	275	545.5235913	0	378.9817	0.000270199	0	542.34878	110725.5116
7	325	538.0382654	0	422.4043	0.000146576	0	537.50588	109809.4589

CHAIN 4

Mid-Segment Loads; * indicates seabed contact								
Segment	Arc Length (m)	Effective Tension (kN)	Shear Force (kN)	Bend Radius (m)	Curvature (rad/m)	Bend Moment (kN.m)	Wall Tension (kN)	Max von Mises Stress (kPa)
1	25	681.4800406	0	1398.919	0.000715	0	680.5628511	129169.447
2	75	666.2101566	0	853.5676	0.001172	0	666.3221528	127667.8609
3	125	651.92797	0	1128.358	0.000886	0	651.3043066	126654.2885
4	175	640.0289094	0	1113.4	0.000898	0	639.8488941	125932.3626
5	225	631.3171905	0	886.041	0.001129	0	630.7641806	125478.1231
6 *	275	628.9087289	0	1477.236	0.000677	0	628.2142327	125550.5155
7 *	325	630.666415	0	1126.434	0.000256	0	629.9694517	128090.8371

CHAIN 5

Mid-Segment Loads; * indicates seabed contact								
Segment	Arc Length (m)	Effective Tension (kN)	Shear Force (kN)	Bend Radius (m)	Curvature (rad/m)	Bend Moment (kN.m)	Wall Tension (kN)	Max von Mises Stress (kPa)
1	25	586.2321931	0	675.0543	0.000105	0	586.148611	117509.7098
2	75	571.771828	0	639.1343	0.000191	0	570.669704	115704.5712
3	125	565.504879	0	443.9735	0.000206	0	564.763691	114028.9973
4	175	556.1123121	0	423.4244	0.00027	0	555.6966042	112506.9648
5	225	554.876521	0	411.418	0.00023	0	554.44113	111158.7501
6	275	542.72886	0	400.1187	0.000226	0	541.64723	108979.6603
7	325	535.3848669	0	392.1787	0.000164	0	534.5884911	108952.8428

CHAIN 6

Mid-Segment Loads; * indicates seabed contact								
Segment	Arc Length (m)	Effective Tension (kN)	Shear Force (kN)	Bend Radius (m)	Curvature (rad/m)	Bend Moment (kN.m)	Wall Tension (kN)	Max von Mises Stress (kPa)
1	25	562.9861608	0	1069.63507	0.009461065	0	562.2950002	111619.0693
2	75	546.889277	0	1062.52616	0.000164948	0	545.624221	106872.9338
3	125	540.7265692	0	928.010535	0.000195198	0	538.9212161	106118.7428
4	175	534.6539988	0	1016.39405	0.000255337	0	532.3484206	105375.5828
5	225	528.9357748	0	811.442848	0.000221659	0	526.1824503	104675.7877
6	275	523.1764909	0	1002.74628	0.000175354	0	520.0210692	103970.9676
7	325	516.8832435	0	927.429988	0.000830053	0	513.3616917	103200.8012

Dari analisis tersebut, penulis mendapatkan luaran tension maksimum persegment yang dimiliki oleh masing-masing *anchor chain* sebagai berikut :

CHAIN 1	Tension Maksimum	Tension Minimum	MPS (Max)	MPS (Min)
Segment 1	684.109	122.561	150.55	33.068
Segment 2	667.001	2.542	146.77	0.0034
Segment 3	652.933	0	143.66	0
Segment 4	641.548	0	141.15	0
Segment 5	633.989	0	139.48	0
Segment 6	630.862	0	138.79	0
Segment 7	633.003	0	139.26	0

CHAIN 2	Tension Maksimum	Tension Minimum	MPS (Max)	MPS (Min)
Segment 1	619.7958984	127.1342773	136.34	27.925
Segment 2	623.9335938	11.6791351	137.26	0.0121
Segment 3	625.7265625	0	137.66	0
Segment 4	626.0527344	0	137.73	0
Segment 5	624.4853516	0	137.38	0
Segment 6	618.8671875	0	136.13	0
Segment 7	609.1210938	0	133.99	0

CHAIN 3	Tension Maksimum	Tension Minimum	MPS (Max)	MPS (Min)
Segment 1	597.7949219	74.54833984	131.49	33.068
Segment 2	609.3730469	8.295410156	134.04	0.0042
Segment 3	608.0517578	0	133.75	0
Segment 4	594.1025391	0	130.67	0
Segment 5	597.4003906	0	131.4	0
Segment 6	598.7695313	0	131.7	0
Segment 7	594.9003906	0	130.85	0

CHAIN 4	Tension Maksimum	Tension Minimum	MPS (Max)	MPS (Min)
Segment 1	695.9177246	100.4513241	153.16	22.064
Segment 2	690.4714355	1.918212221	151.96	0.0000
Segment 3	688.454834	0	151.51	0
Segment 4	682.5891113	0	150.21	0
Segment 5	684.2019043	0	150.57	0
Segment 6	685.5566406	0	150.87	0
Segment 7	683.2165527	0	150.35	0

CHAIN 5	Tension Maksimum	Tension Minimum	MPS (Max)	MPS (Min)
Segment 1	594.3935547	87.72705078	130.74	19.269
Segment 2	598.9013672	4.910644531	131.73	0.0001
Segment 3	596.7578125	0	131.26	0
Segment 4	596.1494141	0	131.12	0
Segment 5	600.109375	0	132.08	0
Segment 6	593.6660156	0	130.58	0
Segment 7	588.6572266	0	129.47	0

CHAIN 6	Tension Maksimum	Tension Minimum	MPS (Max)	MPS (Min)
Segment 1	581.5683594	107.7841797	127.91	23.675
Segment 2	582.9296875	12.89453125	128.21	0.0182
Segment 3	583.3652344	0	128.31	0
Segment 4	581.4775391	0	127.89	0
Segment 5	579.4375	0	127.44	0
Segment 6	583.4589844	0	128.33	0
Segment 7	581.4130859	0	127.88	0

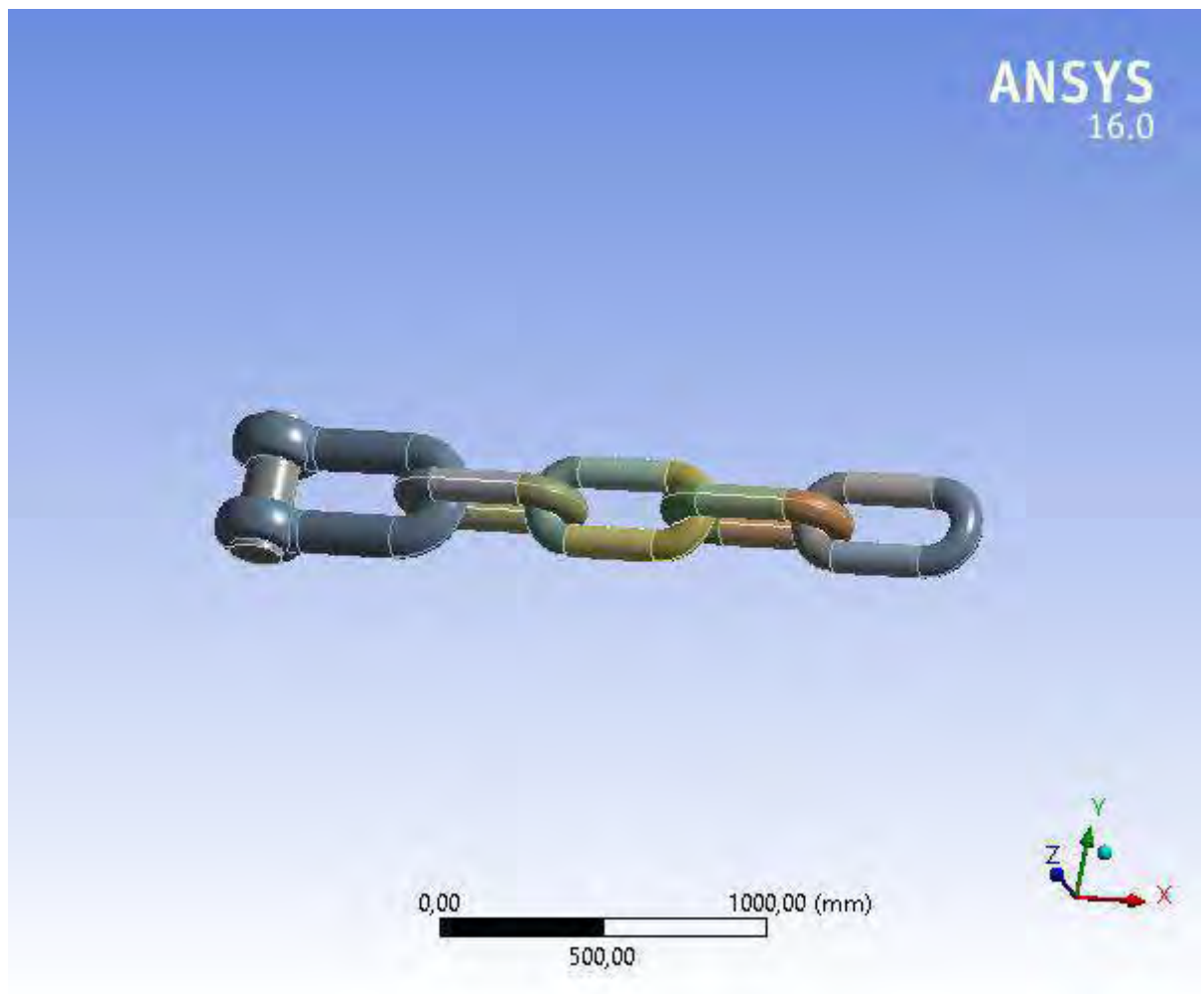
Didapatkan *tension* terbesar dari *anchor chain* terjadi pada *segment 1*.

LAMPIRAN D
Hasil Ouput ANSYS Mechanical



Project

First Saved	Tuesday, June 7, 2016
Last Saved	Tuesday, June 14, 2016
Product Version	16.0 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



Model (A4)

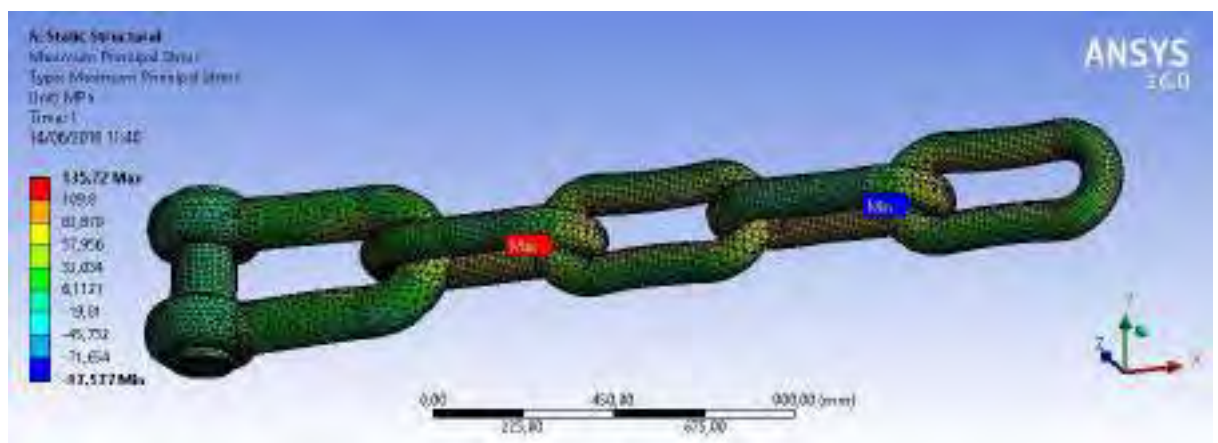
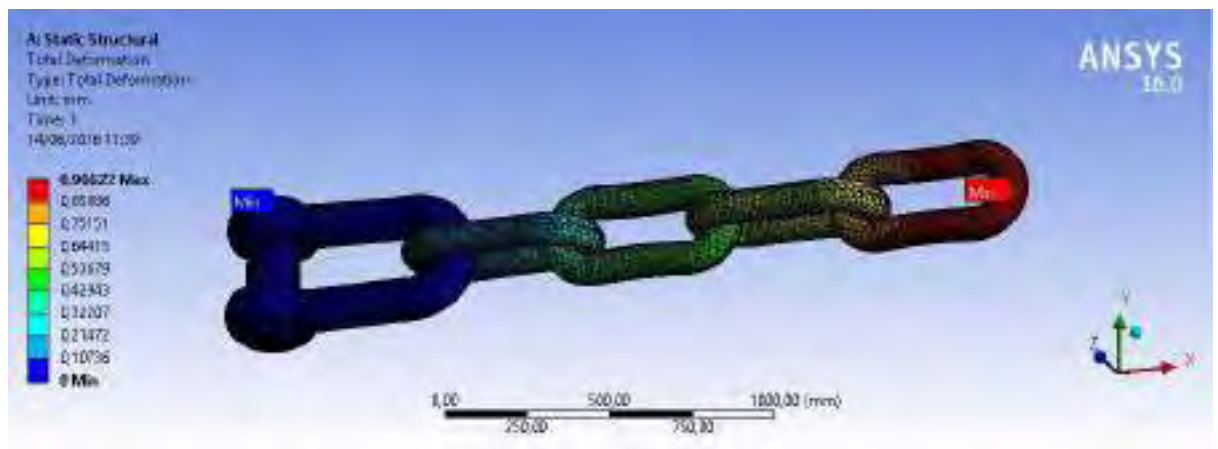
Anchor Chain

TABLE 2
Model (A4) > Geometry

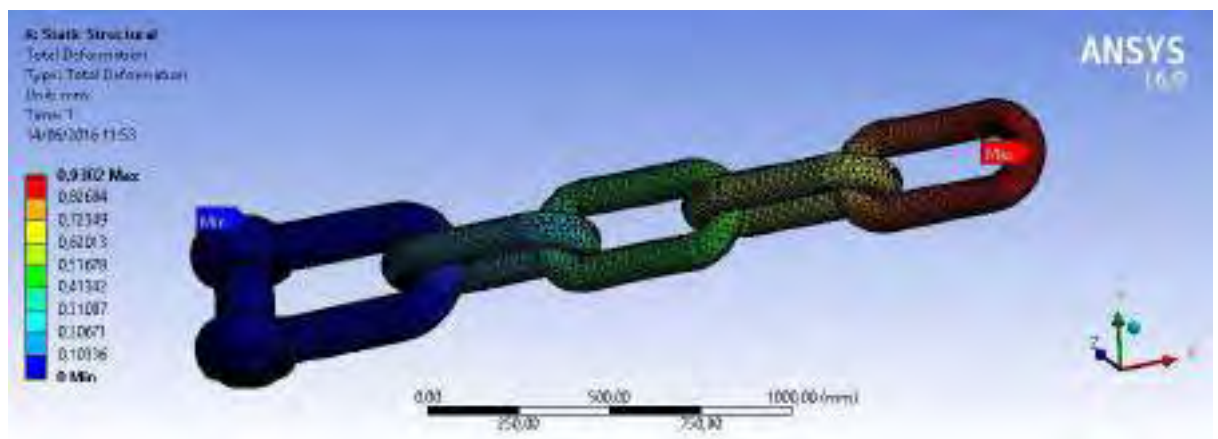
Object Name	<i>Anchor Chain</i>
State	Fully Defined
Definition	
Source	C:\Users\Nabila\Downloads\Tugas Akhir\Proses\P3 - Running\Permodelan\Ansys Mechanical\Beban Ansys Mechanical\Full Load\0 Derajat\Stress 0 Derajat_files\dp0\SYS\DM\SYS.agdb
Type	DesignModeler
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
Bounding Box	
Length X	2488, mm
Length Y	448,8 mm
Length Z	332,51 mm
Properties	
Volume	7,5975e+007 mm ³
Mass	0,5964 t
Scale Factor Value	1,
Statistics	
Bodies	21
Active Bodies	21
Nodes	261855
Elements	81633
Mesh Metric	None
Basic Geometry Options	
Parameters	Yes
Parameter Key	DS
Attributes	No
Named Selections	No

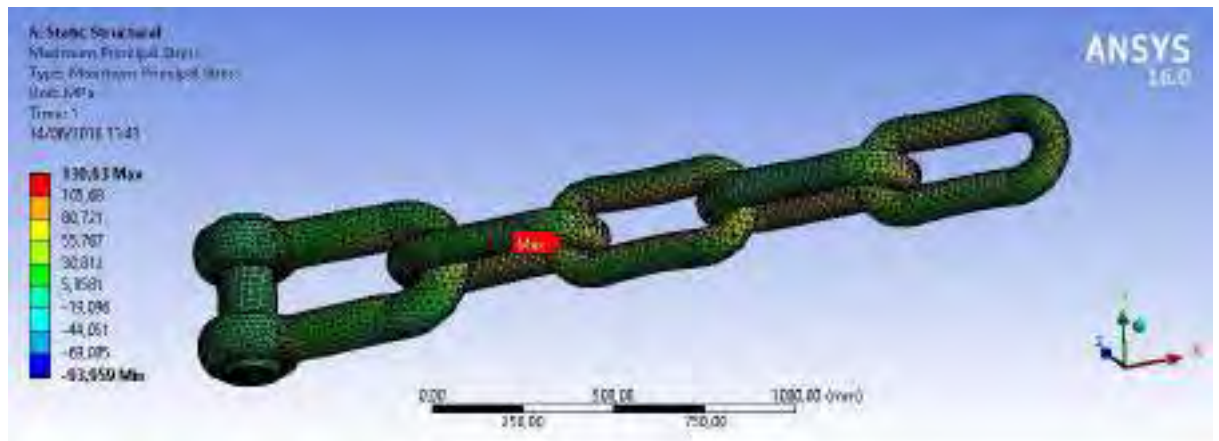
Material Properties	No
Advanced Geometry Options	
Use Associativity	Yes
Coordinate Systems	No
Reader Mode Saves Updated File	No
Use Instances	Yes
Smart CAD Update	No
Compare Parts On Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	C:\Users\Nabila\AppData\Local\Temp
Analysis Type	3-D
Decompose Disjoint Geometry	Yes

Hasil Konfigurasi Pembebanan dari *heading angle* 0° kondisi muatan *Full Load*



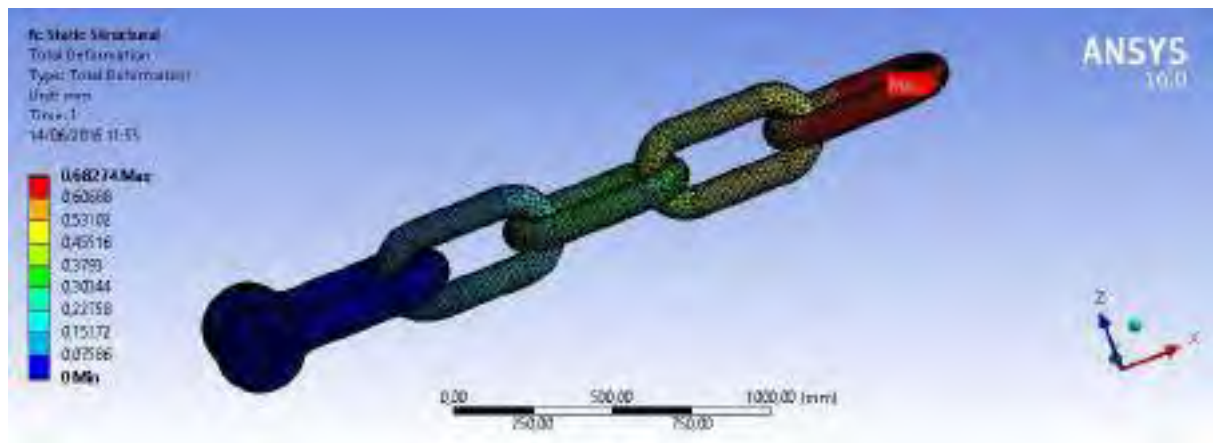
Hasil Konfigurasi Pembebanan dari *heading angle* 90° kondisi muatan *Full Load*



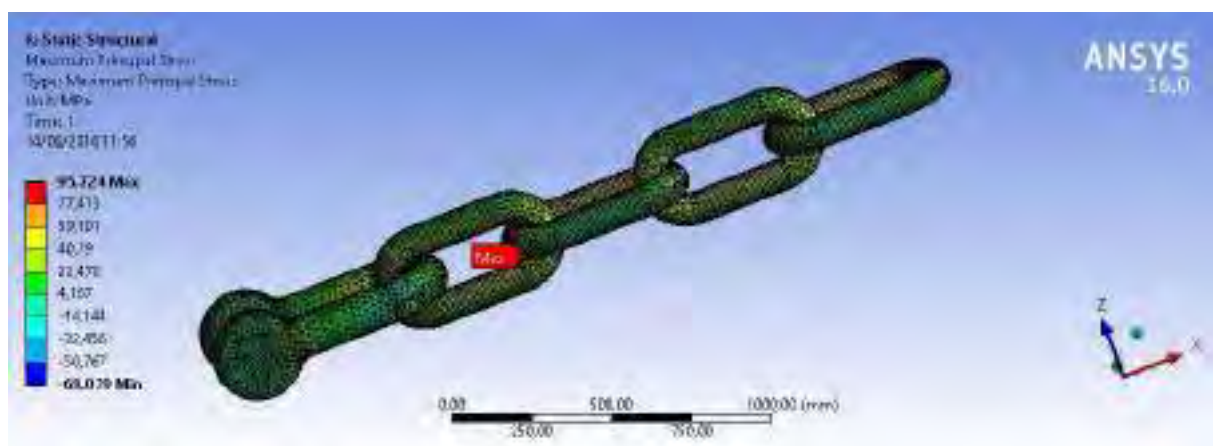


Maximum Principal Stress

Hasil Konfigurasi Pembebanan dari *heading angle* 180° kondisi muatan *Full Load*

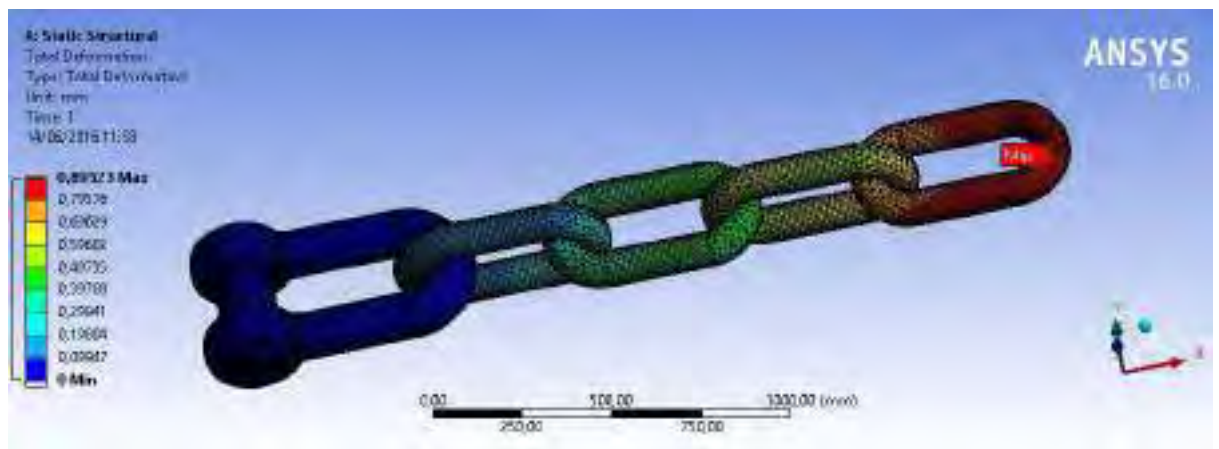


Deformasi

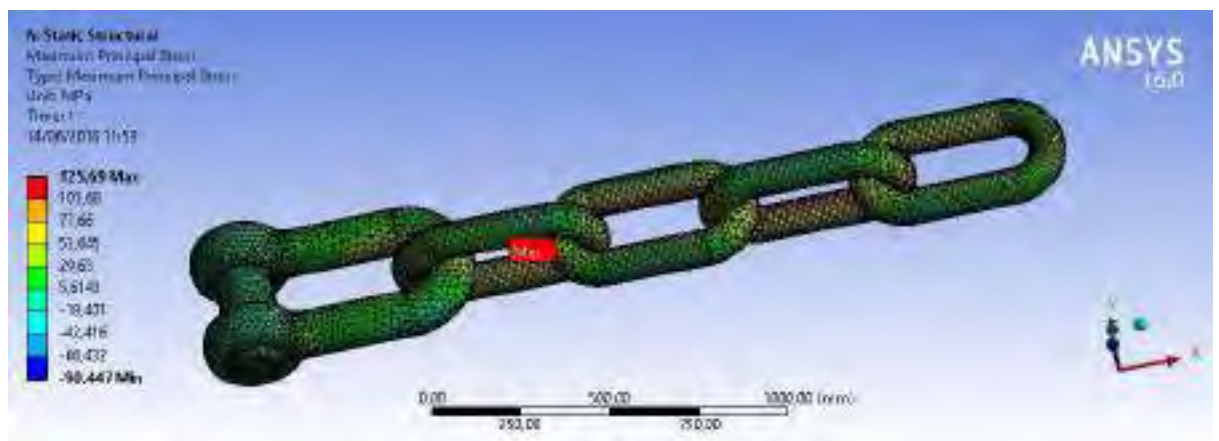


Maximum Principal Stress

Hasil Konfigurasi Pembebanan dari *heading angle* 0° kondisi muatan *Light Load*

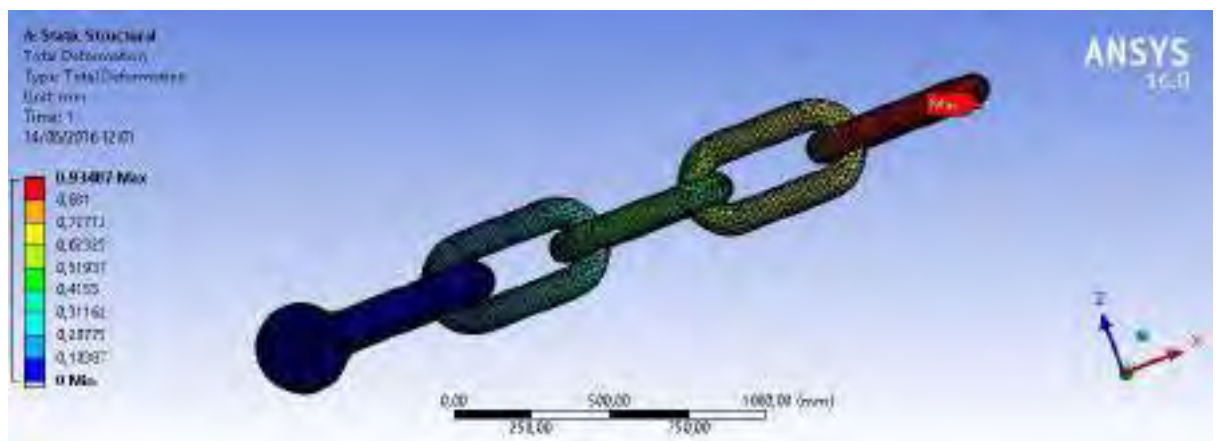


Deformasi

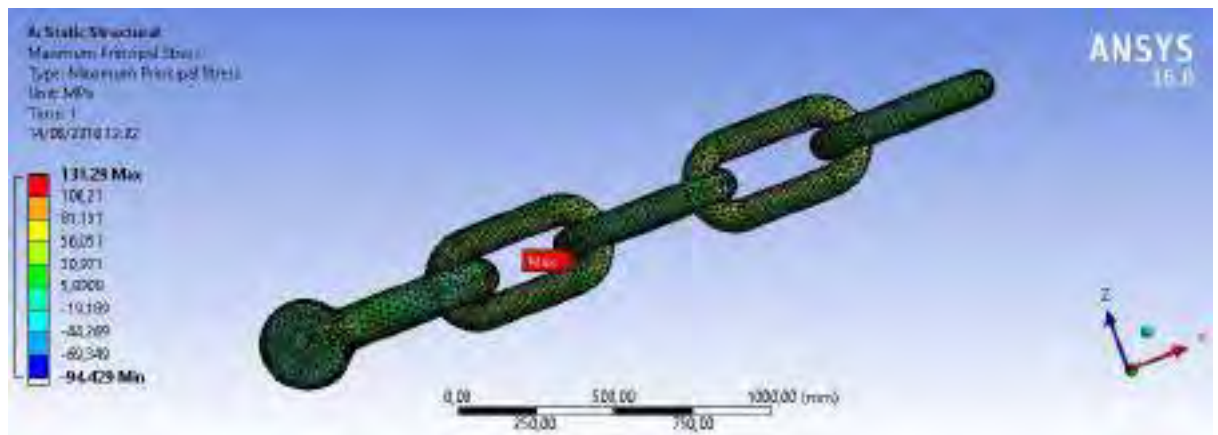


Maximum Principal Stress

Hasil Konfigurasi Pembebanan dari *heading angle* 90° kondisi muatan *Light Load*

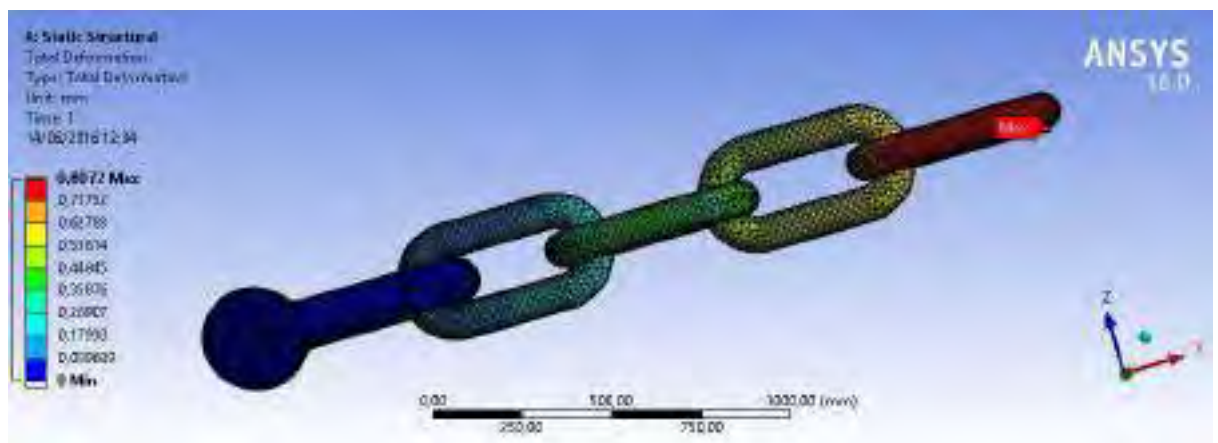


Deformasi

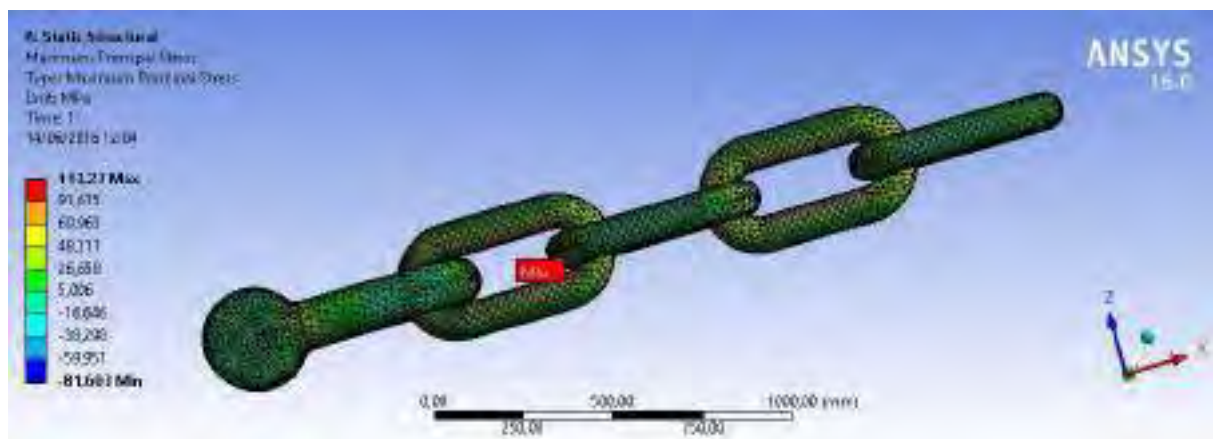


Maximum Principal Stress

Hasil Konfigurasi Pembebanan dari *heading angle* 180° kondisi muatan *Light Load*



Deformasi



Maximum Principal Stress

LAMPIRAN E
Perhitungan *Damage Cumulative*

CHAIN 1

LC - 1 / LC - 7				LC - 2 / LC - 8			
S_{Ri}	=	258.62		S_{Ri}	=	137.26	
Stress Range				Stress Range			
S_{Ri}	=	258.62	N/mm ²	S_{Ri}	=	137.26	N/mm ²
N_R	=	1.00E+04	cycles	N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1		α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor	f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year	U	=	30	year
	=	9.46E+08	second		=	9.46E+08	second
L	=	350	m	L	=	350	m
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$			=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07		N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters				SN-curve parameters			
m	=	3		m	=	3	
Δm	=	2		Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12		K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4	N/mm ²	S_q	=	53.4	N/mm ²
Weibull parameter				Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L - 100}{300}$			=	$1.1 - 0.35 \frac{L - 100}{300}$	
α	=	0.8		α	=	0.8	
ξ	=	0.88366259		ξ	=	0.883663	
v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q} \right)^{\frac{1}{m}} \Delta N_{Ri}$	0.10	v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q} \right)^{\frac{1}{m}} \Delta N_{Ri}$	0.16
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39	$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66	$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07	$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		7.74E-06	$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		6.81E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		6.35E-12	$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		9.84E-10
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=		191.99089	$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=		60.97322
μ_i	=	$1 - \frac{\left\{ \gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right) \right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$		μ_i	=	$1 - \frac{\left\{ \gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right) \right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.99999923			=	0.999993	
Fatigue damage				Fatigue damage			
DM_i	=	$\sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$		DM_i	=	$\sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	
DM	=	8.23E-01		DM	=	1.23E-01	

LC - 3 / LC - 9			
S_{Ri}	=	137.66	
Stress Range			
S_{Ri}	=	137.66 N/mm ²	
N_R	=	1.00E+04 cycles	
α_i	=	1	
f_0	=	1 operation factor	
U	=	30 year	
	=	9.46E+08 second	
L	=	350 m	
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters			
m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4 N/mm ²	
Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$	
α	=	0.8	
ξ	=	0.883663	
v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q}\right)^{\frac{1}{m}} \ln N_{Ri}$	0.16
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		6.74E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		9.61E-10
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=		61.29533
μ_i	=	$1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.999993	
Fatigue damage			
$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$			
DM	=	1.24E-01	

LC - 4 / LC - 10			
S_{Ri}	=	137.73	
Stress Range			
S_{Ri}	=	137.73 N/mm ²	
N_R	=	1.00E+04 cycles	
α_i	=	1	
f_0	=	1 operation factor	
U	=	30 year	
	=	9.46E+08 second	
L	=	350 m	
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters			
m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4 N/mm ²	
Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$	
α	=	0.8	
ξ	=	0.883663	
v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q}\right)^{\frac{1}{m}} \ln N_{Ri}$	0.16
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		6.73E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		9.58E-10
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=		61.35178
μ_i	=	$1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.999993	
Fatigue damage			
$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$			
DM	=	1.24E-01	

LC - 5 / LC - 11			
S_{Ri}	=	137.38	
Stress Range			
S_{Ri}	=	137.38 N/mm ²	
N_R	=	1.00E+04 cycles	
α_i	=	1	
f_0	=	1 operation factor	
U	=	30 year	
	=	9.46E+08 second	
L	=	350 m	
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters			
m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4 N/mm ²	
Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$	
α	=	0.8	
ξ	=	0.883663	
v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q}\right)^{\frac{1}{m}} \ln N_{Ri}$	0.16
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		6.79E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		9.77E-10
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=		61.06977
μ_i	=	$1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.999993	
Fatigue damage			
$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$			
DM	=	1.23E-01	

LC - 6 / LC - 12			
S_{Ri}	=	136.13	
Stress Range			
S_{Ri}	=	136.13 N/mm ²	
N_R	=	1.00E+04 cycles	
α_i	=	1	
f_0	=	1 operation factor	
U	=	30 year	
	=	9.46E+08 second	
L	=	350 m	
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters			
m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4 N/mm ²	
Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$	
α	=	0.8	
ξ	=	0.883663	
v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q}\right)^{\frac{1}{m}} \ln N_{Ri}$	0.16
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		7.01E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		1.05E-09
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=		60.06737
μ_i	=	$1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.999993	
Fatigue damage			
$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$			
DM	=	1.20E-01	

CHAIN 2

LC - 1 / LC - 7					LC - 2 / LC - 8				
S_{Ri}	=	137.26			S_{Ri}	=	137.26		
Stress Range					Stress Range				
S_{Ri}	=	137.26	N/mm ²		S_{Ri}	=	137.26	N/mm ²	
N_R	=	1.00E+04	cycles		N_R	=	1.00E+04	cycles	
α_i	=	1			α_i	=	1		
f_0	=	1	operation factor		f_0	=	1	operation factor	
U	=	30	year		U	=	30	year	
	=	9.46E+08	second			=	9.46E+08	second	
L	=	350	m		L	=	350	m	
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$				=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$		
N_L	=	9.30E+07			N_L	=	9.30E+07		
SN-curve parameters					SN-curve parameters				
m	=	3			m	=	3		
Δm	=	2			Δm	=	2		
K_2	=	1.04E+12			K_2	=	1.04E+12		
S_q	=	53.4	N/mm ²		S_q	=	53.4	N/mm ²	
Weibull parameter					Weibull parameter				
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L - 100}{300}$				=	$1.1 - 0.35 \frac{L - 100}{300}$		
α	=	0.8			α	=	0.8		
ξ	=	0.88366259			ξ	=	0.883663		
v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \Delta N_s$		0.16	v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \Delta N_s$		0.16
$1 + \frac{m}{\xi}$	=			4.39	$1 + \frac{m}{\xi}$	=			4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=			6.66	$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=			6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=			10.07	$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=			10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=			6.81E-05	$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=			6.81E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=			9.84E-10	$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=			9.84E-10
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	60.97322			$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	60.97322		
μ_i	=	$1 - \frac{\left\{ \gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right) \right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$			μ_i	=	$1 - \frac{\left\{ \gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right) \right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$		
	=	0.99999324				=	0.999993		
Fatigue damage					Fatigue damage				
DM_i	=	$\sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$			DM_i	=	$\sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$		
DM	=	1.23E-01			DM	=	1.23E-01		

LC - 3 / LC - 9				LC - 4 / LC - 10			
S_{Ri}	=	137.66		S_{Ri}	=	137.73	
Stress Range				Stress Range			
S_{Ri}	=	137.66 N/mm ²		S_{Ri}	=	137.73 N/mm ²	
N_R	=	1.00E+04 cycles		N_R	=	1.00E+04 cycles	
α_i	=	1		α_i	=	1	
f_0	=	1 operation factor		f_0	=	1 operation factor	
U	=	30 year		U	=	30 year	
	=	9.46E+08 second			=	9.46E+08 second	
L	=	350 m		L	=	350 m	
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$			=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07		N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters				SN-curve parameters			
m	=	3		m	=	3	
Δm	=	2		Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12		K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4 N/mm ²		S_q	=	53.4 N/mm ²	
Weibull parameter				Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$			=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$	
α	=	0.8		α	=	0.8	
ξ	=	0.883663		ξ	=	0.883663	
v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q}\right)^{\frac{1}{m}} \ln N_{Ri}$	= 0.16	v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q}\right)^{\frac{1}{m}} \ln N_{Ri}$	= 0.16
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		= 4.39	$1 + \frac{m}{\xi}$	=		= 4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		= 6.66	$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		= 6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		= 10.07	$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		= 10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		= 6.74E-05	$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		= 6.73E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		= 9.61E-10	$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		= 9.58E-10
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	61.29533		$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	61.35178	
μ_i	=	$1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$		μ_i	=	$1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.999993			=	0.999993	
Fatigue damage				Fatigue damage			
$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$				$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$			
DM	=	1.24E-01		DM	=	1.24E-01	

LC - 5 / LC - 11				LC - 6 / LC - 12			
S_{Ri}	=	137.38		S_{Ri}	=	136.13	
Stress Range				Stress Range			
S_{Ri}	=	137.38 N/mm ²		S_{Ri}	=	136.13 N/mm ²	
N_R	=	1.00E+04 cycles		N_R	=	1.00E+04 cycles	
α_i	=	1		α_i	=	1	
f_0	=	1 operation factor		f_0	=	1 operation factor	
U	=	30 year		U	=	30 year	
	=	9.46E+08 second			=	9.46E+08 second	
L	=	350 m		L	=	350 m	
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$			=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07		N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters				SN-curve parameters			
m	=	3		m	=	3	
Δm	=	2		Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12		K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4 N/mm ²		S_q	=	53.4 N/mm ²	
Weibull parameter				Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$			=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$	
α	=	0.8		α	=	0.8	
ξ	=	0.883663		ξ	=	0.883663	
v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q}\right)^{\frac{1}{m}} \ln N_{Ri}$	0.16	v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q}\right)^{\frac{1}{m}} \ln N_{Ri}$	0.16
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39	$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66	$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07	$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		6.79E-05	$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		7.01E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		9.77E-10	$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		1.05E-09
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	61.06977		$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	60.06737	
μ_i	=	$1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$		μ_i	=	$1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.999993			=	0.999993	
Fatigue damage				Fatigue damage			
$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$				$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$			
DM	=	1.23E-01		DM	=	1.20E-01	

CHAIN 3

LC - 1 / LC - 7				LC - 2 / LC - 8			
S_{Ri}	=	106.426		S_{Ri}	=	134.04	
Stress Range				Stress Range			
S_{Ri}	=	106.426 N/mm ²		S_{Ri}	=	134.04 N/mm ²	
N_R	=	1.00E+04 cycles		N_R	=	1.00E+04 cycles	
α_i	=	1		α_i	=	1	
f_0	=	1 operation factor		f_0	=	1 operation factor	
U	=	30 year		U	=	30 year	
	=	9.46E+08 second			=	9.46E+08 second	
L	=	350 m		L	=	350 m	
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$			=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07		N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters				SN-curve parameters			
m	=	3		m	=	3	
Δm	=	2		Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12		K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4 N/mm ²		S_q	=	53.4 N/mm ²	
Weibull parameter				Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L - 100}{300}$			=	$1.1 - 0.35 \frac{L - 100}{300}$	
α	=	0.8		α	=	0.8	
ξ	=	0.88366259		ξ	=	0.883663	
v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q} \right)^{\frac{1}{m}} \Delta N_R$	= 0.20	v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q} \right)^{\frac{1}{m}} \Delta N_R$	= 0.17
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		= 4.39	$1 + \frac{m}{\xi}$	=		= 4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		= 6.66	$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		= 6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		= 10.07	$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		= 10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		= 0.000162	$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		= 7.38E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		= 7.38E-09	$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		= 1.19E-09
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	38.46534		$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	58.40798	
μ_i	=	$1 - \frac{\left\{ \gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right) \right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$		μ_i	=	$1 - \frac{\left\{ \gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right) \right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.99998396			=	0.999993	
Fatigue damage				Fatigue damage			
DM_i	=	$\sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$		DM_i	=	$\sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	
DM	=	5.74E-02		DM	=	1.15E-01	

LC - 3 / LC - 9				LC - 4 / LC - 10			
S_{Ri}	=	133.75		S_{Ri}	=	130.67	
Stress Range				Stress Range			
S_{Ri}	=	133.75 N/mm ²		S_{Ri}	=	130.67 N/mm ²	
N_R	=	1.00E+04 cycles		N_R	=	1.00E+04 cycles	
α_i	=	1		α_i	=	1	
f_0	=	1 operation factor		f_0	=	1 operation factor	
U	=	30 year		U	=	30 year	
	=	9.46E+08 second			=	9.46E+08 second	
L	=	350 m		L	=	350 m	
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$			=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07		N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters				SN-curve parameters			
m	=	3		m	=	3	
Δm	=	2		Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12		K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4 N/mm ²		S_q	=	53.4 N/mm ²	
Weibull parameter				Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$			=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$	
α	=	0.8		α	=	0.8	
ξ	=	0.883663		ξ	=	0.883663	
v_i	=	$\left(\frac{S_i}{S_q}\right)^{\frac{1}{m}} \ln N_i$	= 0.17	v_i	=	$\left(\frac{S_i}{S_q}\right)^{\frac{1}{m}} \ln N_i$	= 0.17
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		= 4.39	$1 + \frac{m}{\xi}$	=		= 4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		= 6.66	$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		= 6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		= 10.07	$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		= 10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		= 7.44E-05	$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		= 8.05E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		= 1.21E-09	$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		= 1.45E-09
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	58.17937		$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	55.77622	
μ_i	=	$1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$		μ_i	=	$1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.999993			=	0.999992	
Fatigue damage				Fatigue damage			
$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$				$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$			
DM	=	1.14E-01		DM	=	1.06E-01	

LC - 5 / LC - 11				LC - 6 / LC - 12			
S_{Ri}	=	131.4		S_{Ri}	=	131.7	
Stress Range				Stress Range			
S_{Ri}	=	131.4 N/mm ²		S_{Ri}	=	131.7 N/mm ²	
N_R	=	1.00E+04 cycles		N_R	=	1.00E+04 cycles	
α_i	=	1		α_i	=	1	
f_0	=	1 operation factor		f_0	=	1 operation factor	
U	=	30 year		U	=	30 year	
	=	9.46E+08 second			=	9.46E+08 second	
L	=	350 m		L	=	350 m	
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$			=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07		N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters				SN-curve parameters			
m	=	3		m	=	3	
Δm	=	2		Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12		K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4 N/mm ²		S_q	=	53.4 N/mm ²	
Weibull parameter				Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$			=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$	
α	=	0.8		α	=	0.8	
ξ	=	0.883663		ξ	=	0.883663	
v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q}\right)^{\frac{1}{m}} \ln N_{Ri}$	0.17	v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q}\right)^{\frac{1}{m}} \ln N_{Ri}$	0.17
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39	$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66	$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07	$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		7.9E-05	$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		7.84E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		1.39E-09	$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		1.37E-09
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	56.34169		$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	56.57482	
μ_i	=	$1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$		μ_i	=	$1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.999992			=	0.999992	
Fatigue damage				Fatigue damage			
$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$				$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$			
DM	=	1.08E-01		DM	=	1.09E-01	

CHAIN 4

LC - 1 / LC - 7				LC - 2 / LC - 8			
S_{Ri}	=	131.096		S_{Ri}	=	151.96	
Stress Range				Stress Range			
S_{Ri}	=	131.096 N/mm ²		S_{Ri}	=	151.96 N/mm ²	
N_R	=	1.00E+04 cycles		N_R	=	1.00E+04 cycles	
α_i	=	1		α_i	=	1	
f_0	=	1 operation factor		f_0	=	1 operation factor	
U	=	30 year		U	=	30 year	
	=	9.46E+08 second			=	9.46E+08 second	
L	=	350 m		L	=	350 m	
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$			=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07		N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters				SN-curve parameters			
m	=	3		m	=	3	
Δm	=	2		Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12		K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4 N/mm ²		S_q	=	53.4 N/mm ²	
Weibull parameter				Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L - 100}{300}$			=	$1.1 - 0.35 \frac{L - 100}{300}$	
α	=	0.8		α	=	0.8	
ξ	=	0.88366259		ξ	=	0.883663	
v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q} \right)^{\frac{1}{m}} \Delta N_R$	= 0.17	v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q} \right)^{\frac{1}{m}} \Delta N_R$	= 0.15
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39	$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66	$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07	$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		7.97E-05	$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		4.81E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		1.42E-09	$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		4.39E-10
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	56.10590		$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	73.30660	
μ_i	=	$1 - \frac{\left\{ \gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right) \right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$		μ_i	=	$1 - \frac{\left\{ \gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right) \right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.9999921			=	0.999995	
Fatigue damage				Fatigue damage			
DM_i	=	$\sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$		DM_i	=	$\sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	
DM	=	1.07E-01		DM	=	1.67E-01	

LC - 3 / LC - 9				LC - 4 / LC - 10			
S_{Ri}	=	150.21		S_{Ri}	=	150.21	
Stress Range				Stress Range			
S_{Ri}	=	150.21 N/mm ²		S_{Ri}	=	150.21 N/mm ²	
N_R	=	1.00E+04 cycles		N_R	=	1.00E+04 cycles	
α_i	=	1		α_i	=	1	
f_0	=	1 operation factor		f_0	=	1 operation factor	
U	=	30 year		U	=	30 year	
	=	9.46E+08 second			=	9.46E+08 second	
L	=	350 m		L	=	350 m	
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$			=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07		N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters				SN-curve parameters			
m	=	3		m	=	3	
Δm	=	2		Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12		K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4 N/mm ²		S_q	=	53.4 N/mm ²	
Weibull parameter				Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$			=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$	
α	=	0.8		α	=	0.8	
ξ	=	0.883663		ξ	=	0.883663	
$\left(\frac{S_i}{S_q}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \ln N_i$	=		0.15	v_i	=		0.15
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39	$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66	$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07	$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		5.01E-05	$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		5.01E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		4.81E-10	$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		4.81E-10
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	71.78517		$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	71.78517	
μ_i	=	$1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$		μ_i	=	$1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.999995			=	0.999995	
Fatigue damage				Fatigue damage			
$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$				$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$			
DM	=	1.61E-01		DM	=	1.61E-01	

LC - 5 / LC - 11				LC - 6 / LC - 12			
S_{Ri}	=	150.57		S_{Ri}	=	129.47	
Stress Range				Stress Range			
S_{Ri}	=	150.57 N/mm ²		S_{Ri}	=	129.47 N/mm ²	
N_R	=	1.00E+04 cycles		N_R	=	1.00E+04 cycles	
α_i	=	1		α_i	=	1	
f_0	=	1 operation factor		f_0	=	1 operation factor	
U	=	30 year		U	=	30 year	
	=	9.46E+08 second			=	9.46E+08 second	
L	=	350 m		L	=	350 m	
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$			=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07		N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters				SN-curve parameters			
m	=	3		m	=	3	
Δm	=	2		Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12		K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4 N/mm ²		S_q	=	53.4 N/mm ²	
Weibull parameter				Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$			=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$	
α	=	0.8		α	=	0.8	
ξ	=	0.883663		ξ	=	0.883663	
v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q}\right)^{\frac{1}{m}} \ln N_{Ri}$	= 0.15	v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q}\right)^{\frac{1}{m}} \ln N_{Ri}$	= 0.17
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		= 4.39	$1 + \frac{m}{\xi}$	=		= 4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		= 6.66	$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		= 6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		= 10.07	$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		= 10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		= 4.97E-05	$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		= 8.31E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		= 4.72E-10	$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		= 1.56E-09
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	72.09698		$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	54.85223	
μ_i	=	$1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$		μ_i	=	$1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.999995			=	0.999992	
Fatigue damage				Fatigue damage			
$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$				$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$			
DM	=	1.62E-01		DM	=	1.03E-01	

CHAIN 5

LC - 1 / LC - 7				LC - 2 / LC - 8			
S_{Ri}	=	111.471		S_{Ri}	=	131.73	
Stress Range				Stress Range			
S_{Ri}	=	111.471 N/mm ²		S_{Ri}	=	131.73 N/mm ²	
N_R	=	1.00E+04 cycles		N_R	=	1.00E+04 cycles	
α_i	=	1		α_i	=	1	
f_0	=	1 operation factor		f_0	=	1 operation factor	
U	=	30 year		U	=	30 year	
	=	9.46E+08 second			=	9.46E+08 second	
L	=	350 m		L	=	350 m	
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$			=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07		N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters				SN-curve parameters			
m	=	3		m	=	3	
Δm	=	2		Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12		K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4 N/mm ²		S_q	=	53.4 N/mm ²	
Weibull parameter				Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L - 100}{300}$			=	$1.1 - 0.35 \frac{L - 100}{300}$	
α	=	0.8		α	=	0.8	
ξ	=	0.88366259		ξ	=	0.883663	
v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \Delta N_s$	= 0.19	v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \Delta N_s$	= 0.17
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39	$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66	$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07	$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		0.000138	$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		7.84E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		5.12E-09	$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		1.36E-09
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	41.83013		$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	56.59815	
μ_i	=	$1 - \frac{\left\{ \gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right) \right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$		μ_i	=	$1 - \frac{\left\{ \gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right) \right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.99998629			=	0.999992	
Fatigue damage				Fatigue damage			
DM_i	=	$\sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$		DM_i	=	$\sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	
DM	=	6.59E-02		DM	=	1.09E-01	

LC - 3 / LC - 9			
S_{Ri}	=	131.26	
Stress Range			
S_{Ri}	=	131.26 N/mm ²	
N_R	=	1.00E+04 cycles	
α_i	=	1	
f_0	=	1 operation factor	
U	=	30 year	
	=	9.46E+08 second	
L	=	350 m	
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters			
m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4 N/mm ²	
Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$	
α	=	0.8	
ξ	=	0.883663	
v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q}\right)^{\frac{1}{m}} \ln N_{Ri}$	= 0.17
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		7.93E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		1.4E-09
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	56.23305	
μ_i	=	$1 - \frac{\left[\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right]}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.999992	
Fatigue damage			
$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$			
DM	=	1.08E-01	

LC - 4 / LC - 10			
S_{Ri}	=	131.12	
Stress Range			
S_{Ri}	=	131.12 N/mm ²	
N_R	=	1.00E+04 cycles	
α_i	=	1	
f_0	=	1 operation factor	
U	=	30 year	
	=	9.46E+08 second	
L	=	350 m	
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters			
m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4 N/mm ²	
Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$	
α	=	0.8	
ξ	=	0.883663	
v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q}\right)^{\frac{1}{m}} \ln N_{Ri}$	= 0.17
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		7.96E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		1.41E-09
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	56.12450	
μ_i	=	$1 - \frac{\left[\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right]}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.999992	
Fatigue damage			
$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$			
DM	=	1.07E-01	

LC - 5 / LC - 11				LC - 6 / LC - 12			
S_{Ri}	=	132.08		S_{Ri}	=	130.58	
Stress Range				Stress Range			
S_{Ri}	=	132.08 N/mm ²		S_{Ri}	=	130.58 N/mm ²	
N_R	=	1.00E+04 cycles		N_R	=	1.00E+04 cycles	
α_i	=	1		α_i	=	1	
f_0	=	1 operation factor		f_0	=	1 operation factor	
U	=	30 year		U	=	30 year	
	=	9.46E+08 second			=	9.46E+08 second	
L	=	350 m		L	=	350 m	
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$			=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07		N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters				SN-curve parameters			
m	=	3		m	=	3	
Δm	=	2		Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12		K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4 N/mm ²		S_q	=	53.4 N/mm ²	
Weibull parameter				Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$			=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$	
α	=	0.8		α	=	0.8	
ξ	=	0.883663		ξ	=	0.883663	
v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q}\right) \ln N_{Ri}$	= 0.17	v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q}\right) \ln N_{Ri}$	= 0.17
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		= 4.39	$1 + \frac{m}{\xi}$	=		= 4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		= 6.66	$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		= 6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		= 10.07	$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		= 10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		= 7.77E-05	$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		= 8.07E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		= 1.34E-09	$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		= 1.46E-09
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	56.87073		$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=	55.70668	
μ_i	=	$1 - \frac{\left[\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right]}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$		μ_i	=	$1 - \frac{\left[\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right]}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.999992			=	0.999992	
Fatigue damage				Fatigue damage			
$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$				$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$			
DM	=	1.10E-01		DM	=	1.06E-01	

CHAIN 6

LC - 1 / LC - 7				LC - 2 / LC - 8			
S_{Ri}	=	104.235		S_{Ri}	=	128.21	
Stress Range				Stress Range			
S_{Ri}	=	104.235	N/mm ²	S_{Ri}	=	128.21	N/mm ²
N_R	=	1.00E+04	cycles	N_R	=	1.00E+04	cycles
α_i	=	1		α_i	=	1	
f_0	=	1	operation factor	f_0	=	1	operation factor
U	=	30	year	U	=	30	year
	=	9.46E+08	second		=	9.46E+08	second
L	=	350	m	L	=	350	m
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$			=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07		N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters				SN-curve parameters			
m	=	3		m	=	3	
Δm	=	2		Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12		K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4	N/mm ²	S_q	=	53.4	N/mm ²
Weibull parameter				Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L - 100}{300}$			=	$1.1 - 0.35 \frac{L - 100}{300}$	
α	=	0.8		α	=	0.8	
ξ	=	0.88366259		ξ	=	0.883663	
v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q} \right)^{\frac{1}{m}} \Delta N_{Ri}$	0.20	v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q} \right)^{\frac{1}{m}} \Delta N_{Ri}$	0.17
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39	$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66	$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07	$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		0.000174	$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		8.59E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		8.71E-09	$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		1.69E-09
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=		37.04349	$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=		53.88948
μ_i	=	$1 - \frac{\left\{ \gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right) \right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$		μ_i	=	$1 - \frac{\left\{ \gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right) \right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.99998279			=	0.999991	
Fatigue damage				Fatigue damage			
$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$				$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$			
DM	=	5.39E-02		DM	=	1.00E-01	

LC - 3 / LC - 9			
S_{Ri}	=	128.31	
Stress Range			
S_{Ri}	=	128.31 N/mm ²	
N_R	=	1.00E+04 cycles	
α_i	=	1	
f_0	=	1 operation factor	
U	=	30 year	
	=	9.46E+08 second	
L	=	350 m	
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters			
m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4 N/mm ²	
Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$	
α	=	0.8	
ξ	=	0.883663	
v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q}\right)^{\frac{1}{m}} \ln N_{Ri}$	0.17
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		8.57E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		1.68E-09
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=		53.96561
μ_i	=	$1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.999991	
Fatigue damage			
$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$			
DM	=	1.01E-01	

LC - 4 / LC - 10			
S_{Ri}	=	127.89	
Stress Range			
S_{Ri}	=	127.89 N/mm ²	
N_R	=	1.00E+04 cycles	
α_i	=	1	
f_0	=	1 operation factor	
U	=	30 year	
	=	9.46E+08 second	
L	=	350 m	
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters			
m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4 N/mm ²	
Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$	
α	=	0.8	
ξ	=	0.883663	
v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q}\right)^{\frac{1}{m}} \ln N_{Ri}$	0.17
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		8.67E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		1.72E-09
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=		53.64619
μ_i	=	$1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.999991	
Fatigue damage			
$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$			
DM	=	9.96E-02	

LC - 5 / LC - 11			
S_{Ri}	=	127.44	
Stress Range			
S_{Ri}	=	127.44 N/mm ²	
N_R	=	1.00E+04 cycles	
α_i	=	1	
f_0	=	1 operation factor	
U	=	30 year	
	=	9.46E+08 second	
L	=	350 m	
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters			
m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4 N/mm ²	
Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$	
α	=	0.8	
ξ	=	0.883663	
v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q}\right)^{\frac{1}{m}} \ln N_{Ri}$	0.17
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		8.77E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		1.77E-09
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=		53.30490
μ_i	=	$1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.999991	
Fatigue damage			
$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$			
DM	=	9.85E-02	

LC - 6 / LC - 12			
S_{Ri}	=	128.33	
Stress Range			
S_{Ri}	=	128.33 N/mm ²	
N_R	=	1.00E+04 cycles	
α_i	=	1	
f_0	=	1 operation factor	
U	=	30 year	
	=	9.46E+08 second	
L	=	350 m	
	=	$\frac{f_0 U}{4 \log L}$	
N_L	=	9.30E+07	
SN-curve parameters			
m	=	3	
Δm	=	2	
K_2	=	1.04E+12	
S_q	=	53.4 N/mm ²	
Weibull parameter			
	=	$1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$	
α	=	0.8	
ξ	=	0.883663	
v_i	=	$\left(\frac{S_{Ri}}{S_q}\right)^{\frac{1}{m}} \ln N_{Ri}$	0.17
$1 + \frac{m}{\xi}$	=		4.39
$1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}$	=		6.66
$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$	=		10.07
$\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right)$	=		8.57E-05
$\gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)$	=		1.68E-09
$v_i^{-\Delta m/\xi}$	=		53.98084
μ_i	=	$1 - \frac{\left\{\gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, v_i\right) - v_i^{-\Delta m/\xi} \gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, v_i\right)\right\}}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)}$	
	=	0.999992	
Fatigue damage			
$DM_i = \sum_{i=1}^k \frac{\alpha_i N_L}{K_2} \frac{S_{Ri}^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu_i \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$			
DM	=	1.01E-01	

KESIMPULAN

Kesimpulan

Kesimpulan berdasarkan pengerjaan Tugas Akhir ini adalah:

1. Respon struktur FSO Arco Ardjuna dan *Single Point Mooring* akibat beban gelombang pada saat *mooring*, adalah sebagai berikut :
 - RAO FSO Arco Ardjuna, nilai terbesar terjadi pada kondisi *light* dengan *surge* terbesar 0.19 m/m, *sway* 0.22 m/m, *heave* terbesar 0.191 m/m, *roll* terbesar 1.1 °/m, *pitch* terbesar 1.1 °/m, *yaw* terbesar 0.001 °/m.
 - RAO *Single Point Mooring*, nilai terbesar pada saat tertambat dengan FSO Arco Ardjuna kondisi *light load* dengan nilai *surge* 0.95 m/m, *sway* 0.98 m/m, *heave* 2.98 m/m, *roll* 3.12 °/m, *pitch* 2.33 °/m, *yaw* 0.001 °/m.
2. Tegangan terbesar akibat kombinasi pembebanan pada *Anchor Chain SPM 3* adalah 150,55 Mpa yang terjadi pada *Line 1*, 137.38 Mpa pada *Line 2*, 134.04 Mpa pada *Line 3*, 153.16 Mpa pada *Line 4*, 131.73 Mpa pada *Line 5*, dan 127.98 Mpa pada *Line 6*. Nilai tegangan maksimum tersebut masih lebih kecil jika dibandingkan dengan tegangan ijin yang dianjurkan oleh ABS "*Safeshull-Dynamic Loading Approach for FPSO Systems*" sebesar 225 MPa. Dan Nilai deformasi yang dihasilkan juga masih lebih kecil jika dibandingkan dengan syarat deformasi maksimum yang tercantum dalam ABS "*Shipbuilding and Repair Quality Standard for Hull Structures during Construction*" yaitu 11.2 mm.
3. Dari hasil perhitungan umur kelelahan struktur, diperoleh hasil bahwa struktur *Anchor Chain* memiliki harga $D < 1$ sehingga struktur tersebut dapat dikatakan aman untuk melakukan proses *mooring* dengan umur kelelahan struktur paling kecil adalah 94 tahun.

DAFTAR PUSTAKA

- ABS, 1996, *Rules for Building and Classing Single Point Moorings*, USA: American Bureau of Shipping.
- ABS, 2003, *Fatigue Assessment for Offshore Structure*, USA: American Bureau of Shipping ABS Plaza.
- ABS, 2009, *Certification of Mooring Chain*, USA: American Bureau of Shipping ABS Plaza.
- API RP 2SK 3th edition, 2005, *Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures*, Washington DC.
- Bhattacharyya. R., 1978, *Dynamics of Marine Vehicles*, New York: John Wiley & Sons Inc.
- BKI, 2015, *Guidance for The Fatigue Assessment of Offshore Structure*, Jakarta : Biro Klasifikasi Indonesia
- Dawson, Thomas H., 1983, *Offshore Structural Engineering*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Djarmiko, E.B., 2003, *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*. ITS Press. Surabaya
- DNV GL OS E301, 2015, *Position Mooring*, Norway
- DNV GL OS E302, 2015, *Offshore Mooring Chain*, Norway
- DNV GL RP-C203, 2014, *Fatigue Design of Offshore Steel Structure*, Norway
- DNV GL CG 0129, 2015, *Fatigue Assessment of Ship Structure*, Norway
- Faltinsen, O.M, ((1990), *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*, Cambridge University Press., Cambridge, UK.
- Hamzah M., 2015, *Analisis Fatigue pada Kontruksi Crane Pedestal Flosting Storage and Offloading (FSO) Arco Ardjuna Pertamina Hulu Energi ONWJ*, Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, ITS, Surabaya
- Khurana Sandeep, 1998. *Patents protect deepwater platform concepts* . Houston

- Murtedjo, M., 1990, **Teori Gerak, Surabaya** : Jurusan Teknik Kelautan ITS
- Oil Companies International Marine Forum, 2009, ***Tandem Mooring & Offloading Guidelines for Conventional Tankers at F(P)SO Facilities***, United Kingdom: Witherby Seamanship International.
- PHE ONWJ , 2014 , **“Shipping and Ardjuna Marine Terminal Presentation for PDP”**
- Pratama W., 2015, **Analisis Umur Kelelahan Struktur *Catenary Anchor Leg Mooring Buoy* pada *Single Point Mooring* FSO Arco Ardjuna saat Kondisi Tertambat**, Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, ITS, Surabaya
- Sabana, N.H., 2012, **Analisis Tegangan pada Yoke Arm External Turret Mooring System Floating Production Storage and Offloading (FPSO)**, Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, ITS, Surabaya
- Sadat A., dan Mohammad N. M., 2012, **“Analisa Umur Kelelahan (Fatigue Life) Scantling Support Structure Module FSO Cinta Natomas”** Jurusan Teknik Perkapalan, ITS, Surabaya
- Setyawan, W., 2012 **“Analisa Kekuatan Chain Line Pada Mooring Sistem Akibat Konversi Motor Tanker Menjadi Mooring Storage Tanker”** Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan ITS, Surabaya
- Soedjono, J.J., 1989, **“Diktat Kuliah Perencanaan Sistem Bangunan Laut 1”**, Jurusan Teknik Kelautan, ITS, Surabaya.
- Thies P.R, Violette H., Lars J., dan David N.P., 2013, ***Mooring line fatigue damage evaluation for floating marine energy converters: Field measurements and prediction***, University of Exeter.
- Wirsching, P.H., dan Chen, Y, N., 1988, **“Consideration for marine Structure”**, SNAME, One World New York

BIODATA PENULIS



Nabila Arifannisa dilahirkan di kota Tanjungpinang, Kepulauan Riau pada 11 Mei 1995, merupakan anak pertama dari 3 bersaudara pasangan Abdul Hamid dan Mardianti. Penulis menempuh pendidikan formal dimulai dengan menyelesaikan jenjang Pendidikan SD, SMP dan SMA di Tanjungpinang, Kepulauan Riau. Penulis diterima di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui program mandiri dan terdaftar dengan NRP 4312100099. Selama menempuh masa perkuliahan, penulis aktif di berbagai organisasi dan kegiatan kemahasiswaan. Penulis aktif dalam organisasi mahasiswa tingkat jurusan, fakultas dan institut. Penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan sebagai Kepala Divisi Kaderisasi PSDM, sekaligus sebagai Pemandu Samudera LKMM Badan Koordinasi Pemandu FTK pada tahun ketiga. Di tahun terakhir penulis aktif sebagai Dirjen Pelatihan PSDM BEM ITS serta Sekretaris dan Bendahara Pengurus Laboratorium Operasional Riset dan Perancangan Jurusan Teknik Kelautan. Selain itu penulis juga aktif dalam kegiatan kepanitiaan tingkat jurusan hingga institut di ITS. Penulis juga pernah mengikuti kegiatan seminar lokal hingga internasional di bidang rekayasa kelautan. Penulis menerima bantuan beasiswa PPA dari DIKTI untuk periode 2013/2014 dan periode 2014/2015. Pada tahun 2015 penulis berkesempatan melaksanakan kerja praktek di perusahaan PT. Pertamina Hulu Energi *Offshore North West Java* (ONWJ) di T.B. Simatupang, Jakarta Selatan dan mengunjungi *Ardjuna Terminal Offshore Field* untuk mendalami bidang *Shipping Process and Facility Operation* di terminal. Selama masa studi strata 1 yang ditempuh selama 4 tahun, penulis tertarik dalam bidang hidrodinamika dan perancangan struktur bangunan laut sehingga dalam tugas akhir ini mengambil topik analisis umur kelelahan pada *anchor chain*.

Kontak Penulis :

Email : nabila.arifannisa@gmail.com

Telepon : 085765350655